

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta Strojní
Katedra automatizační techniky a řízení

Monitorování a řízení procesů pomocí systému dSPACE

Process Monitoring and Control with System dSPACE

Student: Bc. Roman Hajda

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Renata Wagnerová, Ph.D.

Ostrava 2012

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Roman Hajda**

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor: 3902T004 Automatické řízení a inženýrská informatika

Téma: **Monitorování a řízení procesů pomocí systému dSPACE**
Process Monitoring and Control with System dSPACE

Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se s systémem dSPACE a jeho použitím pro řízení v reálném čase. Popište programové prostředí Real Time Interface a ControlDesk.
2. Analyzujte laboratorní úlohu Levitace v magnetickém poli, s důrazem na možnosti řízení v reálném čase.
3. Navrhněte vybrané algoritmy řízení polohy levitujícího předmětu v magnetickém poli.
4. Správnost návrhu ověřte jak pomocí číslicové simulace, tak i na reálném modelu.
5. Zhodnoťte dosažené výsledky a navrhněte směr dalšího řešení.

Seznam doporučené odborné literatury:

DANISZ, R. *Využití robustních algoritmů pro řízení technologického procesu*. Ostrava: katedra automatizační techniky a řízení, VŠB-TU Ostrava, 2002. 62 st. Diplomová práce, vedoucí: Wagnerová, R.

dSPACE GmbH. *DS1006 Processor Board - Features*. Paderborn: dSPACE GmbH, November 2006, 60p.

dSPACE GmbH. *DS2211 HIL I/O Board - Features*. Paderborn: dSPACE GmbH, March 2007, 218p.

dSPACE GmbH. *dSPACE Simulator Mid-Size Based on DS2211 - Features*. Paderborn: dSPACE GmbH, March 2007, 248p.

MAHDAL, M. & KLEČKA, R. *Komunikace simulátoru dSPACE s vybranými komponenty automobilu*. In XXXIII. Seminar ASR '2008 "Instruments and Control". Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 25. 4. 2008, pp. 205 – 212. ISBN 978-80-248-1727-9.

WAGNEROVÁ, R. *Využití klouzavých módů pro řízení technologických procesů*. Ostrava: Katedra automatizační techniky a řízení, VŠB-TU, 2008. 105 stran. Habilitační práce.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Renata Wagnerová, Ph.D.**

Datum zadání: 16.12.2011

Datum odevzdání: 21.05.2012

prof. Ing. Jiří Tůma, CSc.
vedoucí katedry



prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě:.....

.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohou jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě :.....

.....
podpis

Bc. Roman Hajda

U kostelíčka 491, Hranice 75301

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

HAJDA, R. *Monitorování a řízení procesů pomocí systému dSPACE*, Ostrava:
Katedra ATR – 352 VŠB-TUO, 2012, 53 stran ,Diplomová práce, vedoucí:
Wagnerová, R.

V práci je popsán model levitace v magnetickém poli (levitace klapky), její matematický model, jednotlivé součásti a propojení se systémem dSPACE. Dále se práce zabývá popisem vybraných algoritmů a jejich aplikaci na simulačním a reálné řízení modelu. Dále jsou zde uvedeny výsledné průběhy sledovaných veličin a nastavení parametrů simulace s jejími dopady na výsledek průběhu. Výsledné uživatelské prostředí je vytvořeno v programu ControlDesk. Závěrem jsem zhodnotil dosažené výsledky.

ANNOTATION OF THESIS

HAJDA, R. *Process Monitoring and Control with System dSPACE*, Ostrava:
Department of Control System and Instrumentation, Technical University of Ostrava,
2012, 53 pages, Thesis, supervisor: Wagnerová, R.

This thesis describes model of levitation in a magnetic field (levitation of flap), mathematical model of each component and integration with dSPACE system. The thesis deals with the description of the selected algorithms and their application to simulation and real-time control of the model. There are presented the resulting waveforms of monitored variables and setting of simulation parameters with its impact on the outcome. The resulting user environment is created in ControlDesk. In conclusion, I evaluated the results achieved.

OBSAH

Seznam použitých symbolů a zkratk	7
1 ÚVOD	9
2 SYSTÉMY dSPACE	10
2.1 Metoda Hardware in the loop	10
2.2 Řídicí karta DS1104.....	12
2.3 Ovládací panel CP1104.....	13
3 PROGRAMOVÉ PROSTŘEDKY	14
3.1 Real Time Interface	14
3.2 Program ControlDesk	15
4 POPIS LABORATORNÍ ÚLOHY	17
4.1 Části modelu levitace.....	17
4.2 Matematický model soustavy	18
5 ROBUSTNÍ ALGORITMY	22
5.1 Řízení s vysokým zesílením	22
5.2 Řízení v klouzavém režimu.....	23
6 NÁVRH ALGORITMŮ ŘÍZENÍ	26
6.1 Návrh řízení s vysokým zesílením	26
6.2 Návrh řízení v klouzavém režimu	27
7 SIMULAČNÍ OVĚŘENÍ	29
7.1 Robustní řízení s vysokým zesílením	30
7.2 Robustní řízení v klouzavém režimu	32
8 OVĚŘENÍ ALGORITMŮ NA REÁLNÉM MODELU	38
8.1 Průběhy jednotlivých reálných režimů řízení	39
8.2 Parametry použité pro jednotlivé algoritmy	43
9 VYTVOŘENÍ PROSTŘEDÍ V PROGRAMU CONTROLDESK	44
10 ZÁVĚR	47
11 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	49
PŘÍLOHA	51

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

D	agregační matice
d_i	složky agregační matice
e	vektor regulačních odchylek
e_i	složky vektoru regulačních odchylek
$f(\mathbf{x})$	vektorová funkce, jejíž prvky jsou obecně nelineární funkce
G	matice spojitých obecně nelineárních funkcí
m	rozměr vektoru řídicích proměnných
n	rozměr vektoru stavových proměnných
t	čas
T	diagonální matice časových proměnných
u	vektor řídicích proměnných
u_0	vektor počátečních hodnot řídicích proměnných
u^{sl}	řízení v klouzavém režimu
u^*	optimální řízení
U^m	matice mezních hodnot řídicích proměnných
x	vektor stavových proměnných
x_0	vektor počátečních hodnot stavových proměnných
x^w	vektor žádaných stavových proměnných
Θ, Θ^m	adaptační matice
g	gravitační zrychlení
i	elektrický proud
L	induktance
m	hmotnost levitujícího tělesa
R	elektrický odpor
u	elektrické napětí
x	vzdálenost
T_0	časová konstanta řízení
T_3	časová konstanta řízení
diag	diagonální matice
sat	funkce nasycení
sign	znaménková funkce signum
tgh	funkce hyperbolický tangent

HIL	Hardware in the loop
RTI	Real Time Interface
DAC	D/A převodník
ADC	A/D převodník

1 ÚVOD

Cílem diplomové práce je seznámit se systémem dSPACE a jeho využití pro řízení modelu levitace v magnetickém poli. Konkrétně práce popisuje řízení polohy kovového tělesa při levitaci, a její propojení s počítačem provedené pomocí řídicí karty DS1104 a ovládacího panelu CP1104 systému dSPACE. Dále je popsán návrh robustních algoritmů řízení, které vychází z metody agregace stavových proměnných. Správnost navržených robustních algoritmů řízení jsou ověřeny pomocí simulace v programu Matlab/Simulink. Tyto algoritmy řízení jsou poté aplikovány na reálný model levitace. V poslední části práce se pojednává o navržení uživatelského prostředí v programu ControlDesk, ve kterém bude možno nastavovat jednotlivé algoritmy řízení, jejich konstanty a sledovat průběhy polohy a řízení v reálném čase.

Při návrhu blokových schémat algoritmů bylo využíváno prostředí programu Matlab R2008, tento program je velmi účinný nástroj pro zpracování numerických výpočtů, modelování a simulaci jednotlivých dat, a to díky jeho knihovně Simulink. Práce se také zmiňuje o knihovně Real Time Toolbox, která slouží pro propojení počítače s okolním reálným světem v reálném čase.

Teoretická část diplomové práce je věnována popisu jednotlivých metod robustních algoritmů řízení vycházející z metody agregace stavových proměnných. Praktická část je zaměřena na aplikaci těchto algoritmů na simulační model, ale také na reálný model levitace. Výsledky těchto simulačních a reálných modelů jsou v práci uvedeny. Dále se v praktické části bude věnovat návrhu prostředí v programu ControlDesk, ve kterém budeme veškerá reálná měření provádět.

2 SYSTÉMY DSPACE

dSPACE jsou systémy pro řízení a simulaci v reálném čase. Kombinace výkonného hardwaru s automatickým generováním kódu z prostředí Simulink tvoří špičkový nástroj pro rychlý vývoj řídicích systémů a simulace hardware-in-the-loop(HIL).

Systémy dSPACE jsou využitelné v mnoha oblastech průmyslu a průmyslové automatizace. dSPACE nástroje se používají v celém nebo jednotlivém procesu a mají skutečný dopad na efektivitu vývojového cyklu. V uživatelském rozhraní dSPACE je možno vyvíjet, programovat nebo testovat řídicí jednotky, a přitom se pracuje v jediném komplexním prostředí. To má dopad na zrychlení a zjednodušení vývojového procesu, který pomáhá realizovat nápady a odstranit chyby rychleji.

Typickou oblastí použití jsou návrhy a testování řídicích a mechatronických systémů zejména v automobilovém a leteckém průmyslu, v robotice, elektrických pohonech a dalších oblastech.

Aplikace se vytvářejí v grafickém prostředí Simulink, ze kterého se automaticky vygeneruje odpovídající spustitelný program. Experiment je možné ovládat pomocí virtuálních přístrojů aplikace ControlDesk. [dSPACE, 2007]

2.1 Metoda Hardware in the loop (HIL)

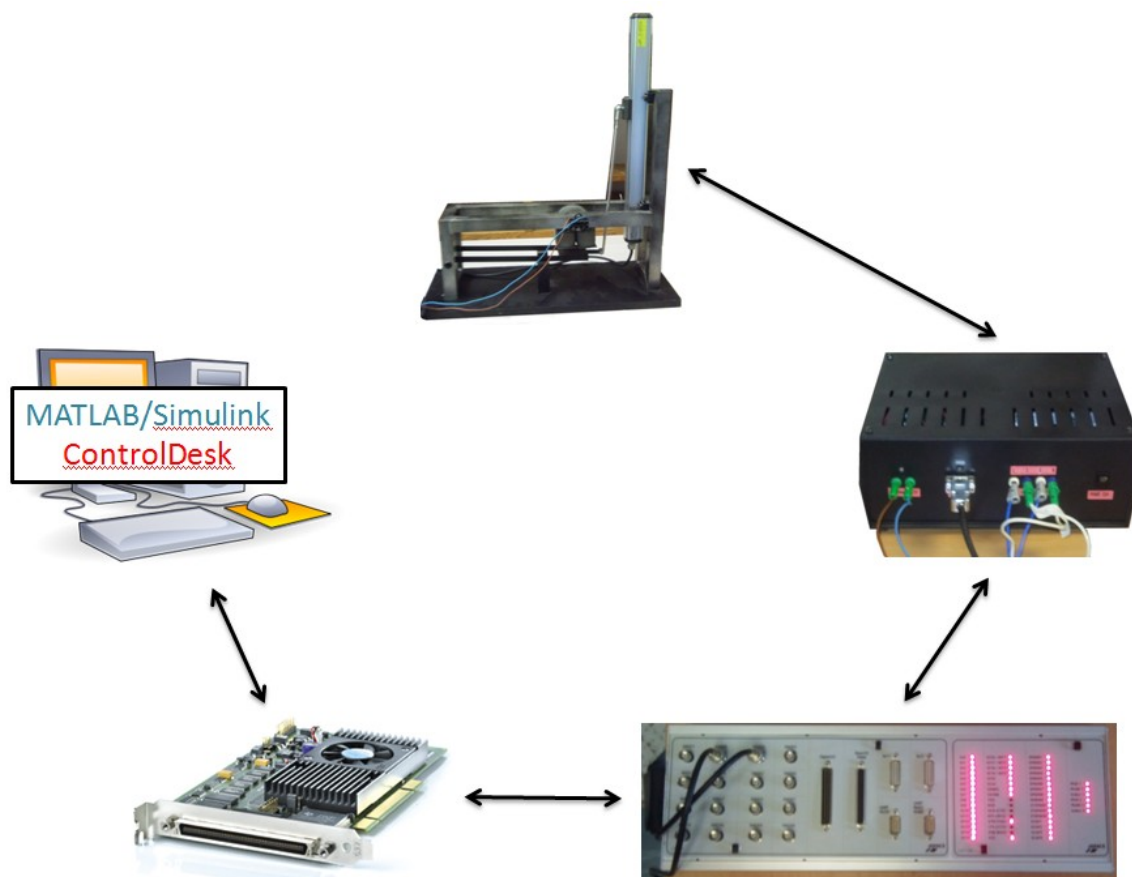
Metoda Hardware in the loop (dále je HIL), česky hardware ve smyčce neboli přesněji hardwarová simulace v uzavřené smyčce je nástroj pro propojení hardware (řídicí systém) s matematickým modelem (řízený systém). K simulaci pomocí této metody potřebujeme dva základní prvky a to: reálný řídicí systém a matematický model řízené soustavy. Vzájemným propojením do uzavřeného regulačního obvodu se objasní název této metody: hardware v uzavřené zpětnovazební smyčce.

Z výše uvedených poznatků plyne, že k samotné simulaci řízené soustavy nemusíme mít tuto soustavu fyzicky k dispozici. Vystačíme si s jejím matematickým modelem. Což je jedna s nesporných výhod, umožňující otestování celých koncepcí před jejich samotnou výrobou. Konstruktor si tak může vyzkoušet celou řízenou soustavu, či jeden prvek soustavy ještě předtím, než jsou vyrobeny. Finanční úspory z toho plynoucí mohou být velké. Mezi další výhody patří možnost nasimulování havarijních stavů, které se skutečnou soustavou nebyly možné, možnost testování v laboratorních podmínkách, dále pak odhalení skrytých problémů, simulování jediného parametru při nastavení ostatních parametrů na konstantní hodnotu atd.

Metoda HIL nalezne uplatnění v širokém spektru průmyslových odvětví, zejména při řízení složitých úloh u komplexních soustav. Například letectví, armádu nebo

automobilový průmysl (např. vyvíjení řídicích jednotek ABS, řídicích jednotek motoru či řídicích jednotek u formule 1). Simulaci pomocí metody HIL lze použít buď při inovaci již stávajících systémů, nebo k návrhu a projekci systémů zcela nových. Výhody metody HIL se tedy dají shrnout do následujících bodů:

- Simulace řízení (prvků) soustav v době jejich návrhu
- Simulace havarijních stavů, které by s fyzickou soustavou nepřicházeli v úvahu
- Možnost simulace jediného parametru při nastavení ostatních parametrů na konstantu
- Ověřování řídicích algoritmů v navrhovaných systémech před jejich nasazením



Obr. 1 Propojení modelu levitace se systémem dSPACE

2.2 Řídicí karta DS1104

Jedná se o řídicí kartu aplikovanou v real-time hardware založený na PowerPC technologii a její sadou I/O rozhraní pro rozvoj řízení v různých oblastech, jako jsou pohony, robotika a letecký průmysl. Tato karta se používá v mnoha univerzitních laboratořích. Klíčové výhody karty

DS1104 je možnost zapojení do PCI slotu v podstatě jakéhokoliv počítače pro rychlou kontrolu prototypingu. Real-time rozhraní poskytují Simulink bloky pro I/O konfiguraci. Pomocí real-time rozhraní můžeme snadno spustit funkci modelu na řídicí desce DS1104. Můžeme si také nastavit všechny I/O graficky, vložením bloku ze Simulinku do bloku diagramu a vytvářet tímto kód modelu pomocí Real-time Workshop. Real-time model je sestaven, stáhnutý a automaticky startován. To snižuje dobu realizace na minimum. [dSPACE, 2007]



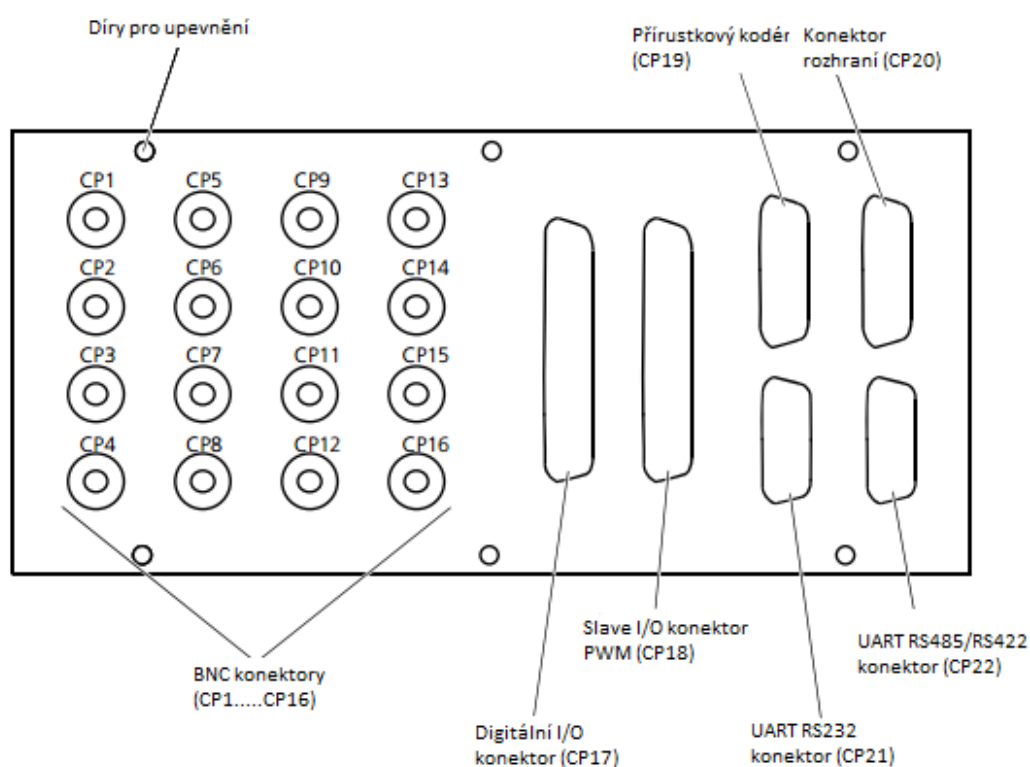
Obr. 2 Karta DS1104

2.3 Ovládací panel CP1104

CP1104 poskytuje snadné propojení mezi řídicí kartou DS1104 a zařízením, ke kterému má být připojeno (model levitace). Pro model použijeme BNC konektory, jeden pro vstup (DAC) a druhý pro výstup (ADC) ze soustavy. Vstupní a výstupní napětí je $\pm 10V$. Jinak další možnosti propojení jsou uvedeny na Obr. 3.



Obr. 3 Reálný ovládací panel



Obr. 4 Různé možnosti propojení s ovládacím panelem CP1104 [dSPACE, 2007]

3 PROGRAMOVÉ PROSTŘEDÍ

V této kapitole se seznámíme s programovým prostředím Real Time Interface (RTI) a ControlDesk. RTI budeme využívat při implementaci simulačních modelů ze Simulinku do systému dSPACE. ControlDesk je program umožňující interaktivní ovládání aplikace pomocí virtuálních přístrojů, sběr naměřených dat a automatizaci experimentů pomocí skriptů a maker.

3.1 Real Time Interface (RTI)

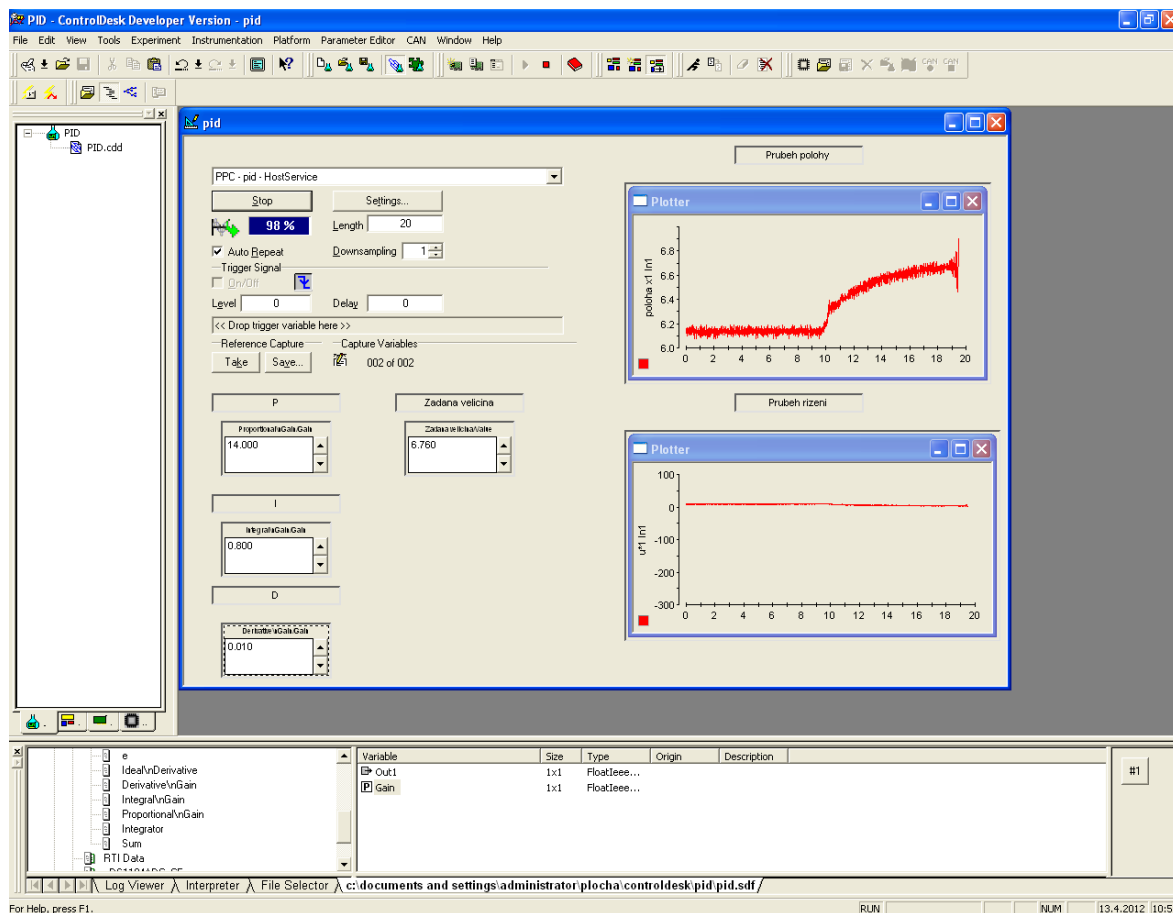
Oblast použití RTI, ať už používáme rychlé ovládání prototypování nebo HIL simulace, je RTI spojení mezi hardwarem dSPACE a vývojovým softwarem MATLAB/Simulink. Chceme-li připojit svůj model dSPACE I/O karty, přetáhneme I/O modul z knihovny RTI a následně připojíme k blokům ze Simulinku. Všechna nastavení jako jsou parametrizace, jsou dostupné kliknutím na příslušné bloky. Real-time Workshop generuje kód modelu a zároveň poskytuje RTI bloky, které používají I/O možnosti dSPACE systémů ve svých modelech Simulinku. Real-time model je sestaven, stáhnut a automaticky spuštěn na real-time hardware, aniž by bylo třeba napsat jediný řádek kódu.

Klíčové výhody RTI jsou ve vlastním návrhu procesu a provedení rychlých iterací. Konfigurace pro real-time aplikace se řídí automatickými kontrolami konzistence, aby se zabránilo parametrizační chybě.

Komplexní funkce RTI zvládá jakékoliv spojitě, diskrétní, hybridní, multi-rate systémy. V závislosti na I/O hardwaru, mohou být různé kanály I/O řídicí karty s různými vzorkovacími frekvencemi, a to i v různých subsystémech. RTI podporuje také asynchronní události a umožňuje nastavit úkol priority a strategii pro provádění úkolů překroční přerušení řízených subsystémů. Podporuje také čas spuštění úlohy a rozvrhy, které umožní realizovat úlohy a skupiny úkolů s proměnnou nebo předdefinovaným zpožděním ve vztahu k souvisejícím spouštěcím událostem. Díky tomu je zpracování úkolu v modelu velmi flexibilní.

3.2 Program ControlDesk

Program umožňuje interaktivní ovládání aplikace pomocí virtuálních přístrojů, sběr naměřených dat a další pokročilejší funkce. ControlDesk je experimentální software dSPACE, který poskytuje všechny funkce pro řízení a monitorování.



Obr. 5 Vzhled prostředí ControlDesk

Funkce v ControlDesk

Vzhledem k tomu, že se ControlDesk se skládá z několika balíčků, můžeme vytvořit softwarové prostředí podle našich potřeb. Instalace nových balíčků přidá nové funkce a nástroje k softwarovému prostředí ControlDesk.

ControlDesk nabízí následující funkce:

Základní funkce

- **Experimental manager** - zajišťuje konzistentní data správy na řízení všech experimentálně-relevantních dat. Experiment lze načíst jako úplný soubor dat v jediné operaci. Obsah experimentu bude definován uživatelem. Chceme-li používat funkce experimentu v programu ControlDesk, musíme nejdříve vytvořit experiment, který bude základ pro všechny další kroky.

- **Platform manager** - umožňuje registrovat dSPACE real-time karty a konfigurovat registrovat platformy (Simulink platforma a dSPACE real-time karty). Kromě toho platform manager umožňuje zpracovávat aplikace na konkrétní platformě a aktualizovat firewall dSPACE real-time karet.

Přístrojové vybavení

Přístrojové vybavení nabízí řadu virtuálních nástrojů k vytvoření a konfigurování virtuálních přístrojových panelů podle našich potřeb. Vstupní nástroje umožňují měnit hodnoty parametrů. Také můžeme kombinovat sadu přístrojového vybavení pro výrobu a virtuální panel, to je taky specifické pro tuto aplikaci.

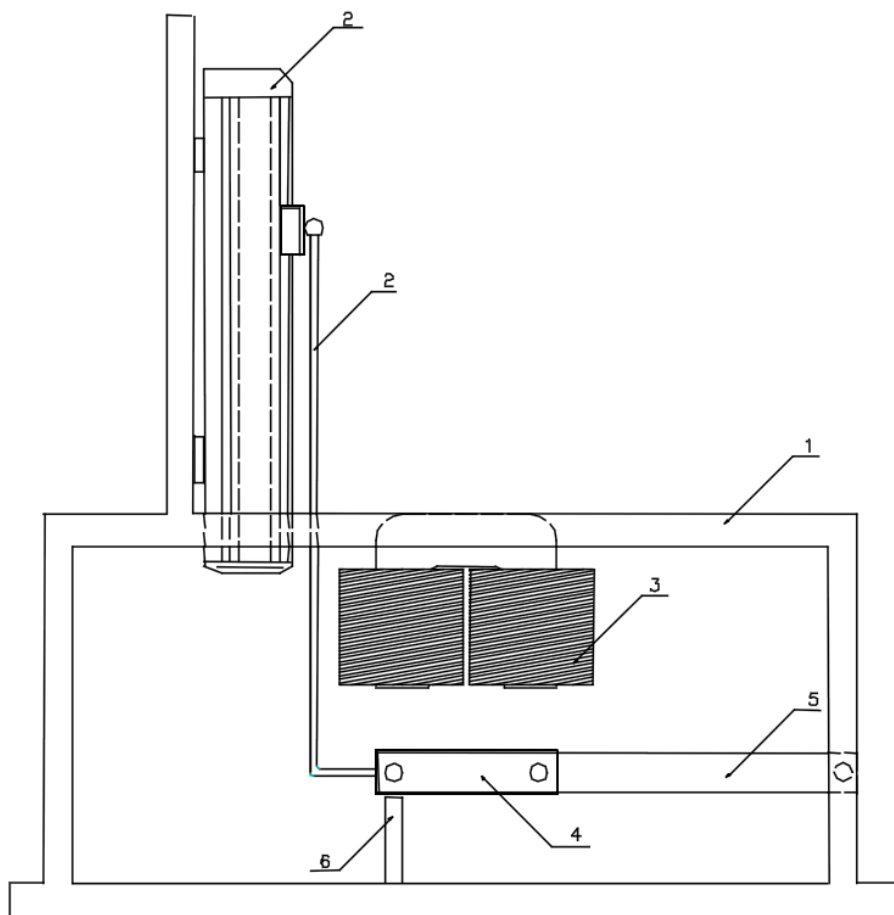
Kromě toho přístrojové vybavení poskytuje data pořizovacím nástrojům, které umožňují shromažďovat data se spuštěného modelu ze Simulinku nebo z real-time platformy. [dSPACE,2007]

4 POPIS LABORATORNÍ ÚLOHY

V této kapitole se práce zabývá popisem modelu levitace klapky. Obsahuje podrobnější popis a výpočty daných součástí [DANISZ, R.,2002]. Další část kapitoly je zaměřena na matematický popis modelu levitace, který bude použit v další části práce pro výslednou simulaci.

4.1 Části modelu levitace

V tomto modelu jde o jednoosou levitaci v magnetickém poli. Těleso je vedeno pomocí dvou táhel připevněných k rámu modelu. Celý model se tedy skládá z rámu (1), snímače polohy (2), elektromagnetu (3), a samozřejmě z levitujícího tělesa (4), tedy klapky. Těleso je vedeno vedením (5), čímž je zajištěn stupeň volnosti. Je třeba zajistit nulovou výchozí polohu (6), což je provedeno podpěrrou. [MURÍNOVÁ, A.,2006]



Obr. 6 Model levitace klapky [DANISZ, R.,2002]

Jednotlivé komponenty modelu

Rám modelu je vyroben z hliníkového profilu, který je odolný proti magnetickému působení. Ze stejného materiálu jsou tak vyrobeny také vedení levitujícího tělesa a podpora zajišťující nulovou výchozí polohu.

Elektromagnet, který slouží k vytváření magnetického pole, byl co nejvhodněji zvolen tak, aby vytvořené magnetické pole i směr magnetických siločar pole byly co nejlepší. Proto bylo zvoleno jádro ve tvaru C, kdy nedochází k tak značným ztrátám ve vzduchové mezeře, jak je tomu např. u jádra válcového typu.

Levitující těleso, klapka, je vyrobeno z transformátorových plechů typu I. Váha tělesa se pohybuje kolem 300g, přičemž do váhy nesmíme zapomenout započítat také šrouby a táhlo snímače.

Snímač polohy je v tomto případě založen na principu magnetostrickce, tedy do kovové trubičky obsahující měděný drát je vpuštěn proudový impuls, který vyvolá magnetické pole. Siločáry ornamentního magnetu, který je zde jako snímač polohy, jsou kolmé na proudové siločáry. V místě křížení obou polí dochází k elastické deformaci, odtud se začne šířit mechanická vlna, která v měřiči signálu vyvolá elektrický signál.

V této kapitole určíme matematický model soustavy levitace v magnetickém poli, který nám umožní aplikaci jednotlivých metod návrhu algoritmů řízení. Matematický model je třeba vyjádřit ve standardním tvaru stavového popisu. Touto problematikou se zabývá také práce [HAVLÁSEK, A. 1997], [KLANER, P. 2000], [DANISZ, R. 2002].

4.2 Matematický model soustavy

Matematický model lze napsat zjednodušeně. Předpokladem je, že těleso se pohybuje v magnetickém poli jen ve svislém směru, nekonečnou permeabilitu jádra a hysterezi magnetickou zanedbáme. Postupným vyjadřováním vztahů pro levitaci v magnetickém poli, jejich podrobnější popis najdeme v [YAMAMOTO, S. & KIMURA, H. 1995], získáme rovnice popisující soustavu ve tvaru

$$m\ddot{x} = mg + \frac{1}{2}i^2 \frac{\partial L(x)}{\partial x} \quad (4.1)$$

$$u = Ri + \frac{d}{dt}(L(x)i) \quad (4.2)$$

$$L(x) = \frac{Q}{X_{\infty} + x} + L_{\infty} \quad (4.3)$$

kde	m	hmotnost levitujícího tělesa (klapka) [kg],
	i	elektrický proud [A],
	x	vzdálenost mezi tělesem a magnetem [m],
	u	elektrické napětí [V],
	$L(x)$	indukce vinutí [Ω],
	R	elektrický odpor [Ω],
	$Q, X_{\infty}, L_{\infty}$	konstanty vinutí, jádra a tělesa.

Po úpravě a vyjádření jednotlivých derivací dostaneme rovnice

$$m\ddot{x} = mg - \frac{Q}{2} \frac{1}{(X_{\infty} + x)^2} i^2 \quad (4.4)$$

$$u = Ri - \frac{Q}{(X_{\infty} + x)^2} \frac{dx}{dt} i + \left(\frac{Q}{X_{\infty} + x} + L_{\infty} \right) \frac{di}{dt} \quad (4.5)$$

Dále rovnici (4.3) parciálně derivujeme podle x , abychom dospěli k dalším tvarům potřebným k uplatnění agregace

$$L(x) = \frac{Q}{X_{\infty} + x} + L_{\infty} \Rightarrow \frac{\partial L(x)}{\partial x} = -\frac{Q}{(X_{\infty} + x)^2} \quad (4.6)$$

Nyní dosadíme rovnici (4.6) dosadíme do rovnice (4.1), ze které vyjádříme proud i .

$$\begin{aligned} m\ddot{x} &= mg + \frac{1}{2} i^2 [-Q(X_{\infty} + x)^{-2}] \\ m\ddot{x} - mg &= -\frac{1}{2} i^2 Q(X_{\infty} + x)^{-2} \\ 2m(\ddot{x} - g) &= -\frac{Q}{(X_{\infty} + x)^2} i^2 \\ i &= \sqrt{\frac{2m}{Q} (g - \ddot{x})(X_{\infty} + x)} \end{aligned} \quad (4.7)$$

Rovnice (4.3) a (4.7) dosadíme do (4.2) a po úpravě dostaneme konečný matematický popis, na který aplikujeme metodu agregace stavových proměnných.

Rovnice je pak ve tvaru

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(L(x)i) &= \frac{dL(x)}{dt}i + L(x)\frac{di}{dt} = -\sqrt{2mQ} \cdot \frac{\sqrt{(g-\ddot{x})}}{(X_\infty+x)} \cdot \frac{dx}{dt} + \left(\frac{Q}{(X_\infty+x)} + L_\infty\right)\frac{di}{dt} \\ u &= R \cdot (X_\infty+x) \sqrt{\frac{2m}{Q}}(g-\ddot{x}) - \frac{Q}{\sqrt{X_\infty+x}} \cdot \dot{x}(X_\infty+x) \sqrt{\frac{2m}{Q}}(g-\ddot{x}) + \\ &+ \left(\frac{Q}{(X_\infty+x)} + L_\infty\right) \cdot \left(\sqrt{\frac{2m}{Q}}(g-\ddot{x}) + \sqrt{\frac{2m}{Q}}(X_\infty+x) \cdot \frac{0,5}{X_\infty+x} \cdot (-\ddot{x}) \right) \end{aligned} \quad (4.8)$$

Tyto rovnice využijeme pro simulaci a návrh robustního algoritmu řízení, to znamená, že rovnici (4.8) upravíme tak, aby vyjadřovala změnu polohy v závislosti na fyzikálním popisu úlohy.

$$\begin{aligned} \ddot{x} &= \frac{2Qx_2(g-\ddot{x})}{(X_\infty+x)[Q+L_\infty(X_\infty+x)]} + \frac{2(g-\ddot{x})\dot{x}}{(X_\infty+x)} + \frac{2R(g-\ddot{x}) \cdot (X_\infty+x)}{[Q+L_\infty(X_\infty+x)]} - \\ &- \sqrt{\frac{2Q}{m}} \cdot \frac{\sqrt{g-\ddot{x}}}{Q+L_\infty(X_\infty+x)} \cdot u \end{aligned} \quad (4.9)$$

Následuje zavedení stavových proměnných $x_1 = x$, $x_2 = \dot{x}$, $x_3 = \ddot{x}$, které nám umožní napsat matematický model soustavy ve stavovém vyjádření.

$$\dot{x}_1 = x_2$$

$$\dot{x}_2 = x_3$$

$$\dot{x}_3 = f_3(\mathbf{x}) + g_3(\mathbf{x})u$$

Tyto stavové proměnné dosadíme do rovnice (4.9), čímž dostaneme požadovaný tvar, ve kterém se bude vyskytovat první derivace \mathbf{x} . Rovnice je také ve tvaru, do kterého můžeme aplikovat metodu agregace stavových proměnných.

$$\begin{aligned} \dot{x}_3 = & \frac{2Qx_2(g-x_3)}{(X_\infty+x_1)[Q+L_\infty(X_\infty+x_1)]} + \frac{2(g-x_3)x_2}{(X_\infty+x_1)} + \frac{2R(g-x_3) \cdot (X_\infty+x_1)}{[Q+L_\infty(X_\infty+x_1)]} - \\ & - \sqrt{\frac{2Q}{m}} \cdot \frac{\sqrt{g-x_3}}{Q+L_\infty(X_\infty+x_1)} \cdot u \end{aligned} \quad (4.10)$$

$$\begin{aligned} f_3 = & \frac{2Qx_2(g-x_3)}{(X_\infty+x_1)[Q+L_\infty(X_\infty+x_1)]} + \frac{2(g-x_3)x_2}{(X_\infty+x_1)} + \frac{2R(g-x_3) \cdot (X_\infty+x_1)}{[Q+L_\infty(X_\infty+x_1)]} \\ g_3 = & - \sqrt{\frac{2Q}{m}} \cdot \frac{\sqrt{g-x_3}}{Q+L_\infty(X_\infty+x_1)} \cdot u \end{aligned} \quad (4.11)$$

Tyto rovnice, které jsou ve standardním tvaru, již můžeme použít pro návrh jednotlivých algoritmů řízení a také k následné simulaci.

5 ROBUSTNÍ ALGORITMY

V této kapitole se budu zabývat návrhem algoritmů pro řízení polohy levitujícího předmětu. Jedná se o robustní algoritmy vycházející z metody agregace stavových proměnných. Cílem těchto metod je snížení počtu původních stavových proměnných popisující systém řízení, čímž se sníží řád systému a tím také složitost řízení.

5.1 Řízení s vysokým zesílením

V reálných podmínkách, kde mohou působit poruchy a kde dochází ke změně parametrů nelineárního subsystému, je vhodné použít robustní algoritmus řízení. Algoritmus řízení s vysokým zesílením má tvar

$$\mathbf{u}^x = \Theta \left[\mathbf{D} (\mathbf{e} - \mathbf{e}_0) + \mathbf{T}^{-1} \mathbf{D} \int_0^t \mathbf{e} d\tau \right] + \mathbf{u}_0 \quad (5.1)$$

kde	Θ	adaptační matice typu (m,n)
	\mathbf{u}_0	vektor počátečních hodnot řízení
	\mathbf{D}	agregační matice
	\mathbf{e}	vektor regulačních odchylek

Počáteční řízení \mathbf{u}_0 nemusíme vůbec uvažovat, tj. můžeme ho považovat za nulové, ale v tomto případě při jeho startu musíme počítat s možnými velkými a prudkými změnami řízení i dalších veličin, což z praktického hlediska může být nepřístupné.

Výhodou je, že nevyžaduje přesnou znalost matematického modelu. Jen je nutné znát řád systému a musí být měřitelné odchylky. Nevýhodou tohoto algoritmu je nutnost příliš vysokých hodnoty prvků $|\theta_j|$ diagonální matice Θ , což může způsobit výskyt nepřípustně velkých hodnot řídicích proměnných, případně i nestability celého systému řízení. Robustní řízení s vysokým zesílením je možné také zapisovat ve tvaru

$$\mathbf{u}^x = \Theta \mathbf{m} + \mathbf{u}_0 \quad (5.2)$$

$$\mathbf{m} = \int_0^t \mathbf{m}^w d\tau \quad (5.3)$$

$$\mathbf{m}^w = \mathbf{D}_z[\dot{\mathbf{e}} - \mathbf{f}^w(\mathbf{e})] = \mathbf{D}_z\dot{\mathbf{e}} - \mathbf{f}_z^w(\mathbf{e}) \quad (5.4)$$

kde	\mathbf{u}^x	suboptimální zpětnovazební řízení
	\mathbf{u}_0	počáteční řízení
	m	rozměr vektoru řídicích proměnných
	\mathbf{m}^w	funkce agregace stavové proměnné
	$\mathbf{f}^w, \mathbf{f}_z^w$	spojité vektorové funkce

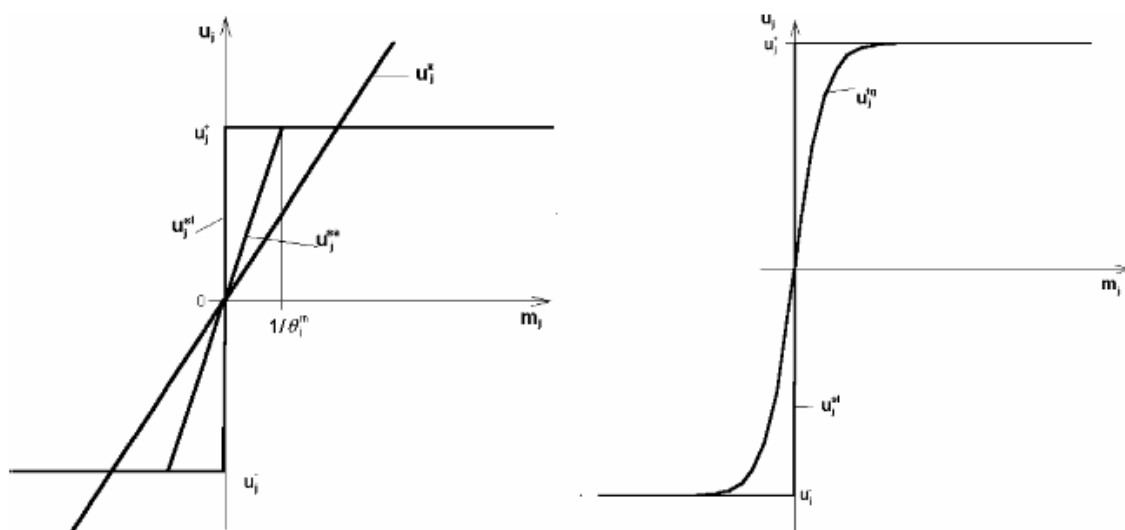
5.2 Řízení v klouzavém režimu

Jedná se o dvoupolohové zařízení, kdy k přepínání mezi mezními hodnotami dochází na základě obecně nelineární funkce, viz Obr. 6 vektor řízení bude mít potom tvar:

$$\mathbf{u}^{sl} = [u_1^{sl}, u_2^{sl}, \dots, u_r^{sl}]^T \quad (5.5)$$

$$u_j^{sl} = \begin{cases} u_j^+ & \text{pro } m_j \geq 0 \\ u_j^- & \text{pro } m_j < 0 \end{cases} \quad (5.6)$$

kde	\mathbf{u}^{sl}	vektor klouzavého řízení,
	u_j^+, u_j^-	složky vektoru klouzavého řízení



Obr. 7 Vztah mezi vysokým zesílením a klouzavými módy [FARANA, R. & WAGNEROVÁ, R. 2001]

$$\mathbf{u}^{sl} = \mathbf{U}^m \text{sign} \left[\mathbf{D} (\mathbf{e} - \mathbf{e}_0) + \mathbf{T}^{-1} \mathbf{D} \int_0^t \mathbf{e} d\tau \right] + \mathbf{u}_0 \quad (5.7)$$

$$\mathbf{U}^m = \text{diag}[u_1^m, u_2^m, \dots, u_m^m]$$

kde \mathbf{U}^m matice mezních hodnot dílčích akčních veličin
 sign znaménková funkce (signum)

Vektor počátečních stavů řízení \mathbf{u}_0 má význam pouze pro udržení řízeného subsystému v rovnovážném stavu pro $t \leq 0$. Klouzavé řízení je nespojité, vysoce robustní a jednoduché, ale má velmi nepříjemnou vlastnost spočívající v přílišné aktivitě řízení projevující se neustálým přepínáním mezi mezními hodnotami $\pm u_j^m$ [ZÍTEK, VÍTEČEK, 1999].

Řízení (5.5) je nespojité a pracuje v klouzavém režimu. V případě potřeby je třeba ve vztahu změnit nerovnosti na opačné. Protože funkce sign (\mathbf{U}^m) nabývá pouze hodnot -1 a 1 je nutno řízení ještě zesílit. To je zajištěno prvky matice \mathbf{U}^m .

Tuto nevýhodu lze odstranit nahrazením nespojitého tvaru funkce signum spojitou aproximací, např. funkcí nasycení

$$\mathbf{u}^{sa} = \mathbf{U}^m \text{sat} \left\{ \mathbf{\Theta}^m \left[\mathbf{D} (\mathbf{e} - \mathbf{e}_0) + \mathbf{T}^{-1} \mathbf{D} \int_0^t \mathbf{e} d\tau \right] \right\} + \mathbf{u}_0 \quad (5.8)$$

$$\mathbf{\Theta}^m = \text{diag}[\Theta_1^m, \Theta_2^m, \dots, \Theta_m^m]$$

nebo funkcí hyperbolický tangent

$$\mathbf{u}^{sa} = \mathbf{U}^m \text{tgh} \left\{ \mathbf{\Theta}^m \left[\mathbf{D} (\mathbf{e} - \mathbf{e}_0) + \mathbf{T}^{-1} \mathbf{D} \int_0^t \mathbf{e} d\tau \right] \right\} + \mathbf{u}_0 \quad (5.9)$$

$$\mathbf{\Theta}^m = \text{diag}[\Theta_1^m, \Theta_2^m, \dots, \Theta_m^m]$$

kde sat funkce nasycení
 tgh hyperbolický tangent
 $\mathbf{\Theta}^m$ kladná diagonální matice, jejíž prvky vyhovují podmínce

$$\theta_j^n \geq |\Theta_j| \quad (5.10)$$

Kombinací hodnot odpovídajících si prvků matice θ^n lze volit tvar (sklon) přímky ve funkci nasycení nebo hyperbolickém tangentu. Na obr. 6 je znázorněn průběh řízení s vysokým zesílením, které je charakteristické prudkými a ostrými změnami veličin a dále klouzavé řízení, které se vyznačuje příslušnou aktivitou. Nejvhodnější je proto používat spojitou náhradu klouzavého řízení.

6 NÁVRH ALGORITMŮ ŘÍZENÍ

V této kapitole si popíšeme samotný návrh vybraných algoritmů řízení pro model levitace. Návrhy budou obsahovat robustní algoritmy, jež byly popsány v kapitole 5. Správnost navržených algoritmů bude ověřena simulačně v programu MATLAB/Simulink. Návrhem algoritmů řízení na základě použití metody agregace stavových proměnných aplikované na různé soustavy se také zabývají práce [HAVLÁSEK, A. 1997], [DANISZ, R. 2002], [VEČEŘA, L. 2005], [MURÍNOVÁ, A. 2006].

6.1 Návrh řízení s vysokým zesílením

U tohoto modelu nemusíme znát ani přesný matematický model systému ani přesné působení poruch. Proto jde o robustní systém, který dokáže reagovat na případné změny, vycházíme tedy ze vzorců pro tuto metodu. Objeví se zde navíc matice Θ , která obsahuje konstanty ovlivňující řízení. Blíže bude její vliv popsán při simulacích jednotlivých metod řízení.

$$u^* = \Theta m + u_0$$

kde

$$m = \mathbf{d}^T \dot{\mathbf{e}} + \mathbf{T}^{-1} \mathbf{d}^T \int_0^t \mathbf{e} d\tau$$

platí

$$\begin{aligned} \dot{e}_1 &= e_2 \\ \dot{e}_2 &= e_3 \end{aligned}$$

Po dosazení tedy dostáváme

$$u^* = \Theta \left\{ \begin{bmatrix} d_1 & d_2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 - e_{10} \\ e_2 - e_{20} \\ e_3 - e_{30} \end{bmatrix} + \frac{1}{T_3} \begin{bmatrix} d_1 & d_2 & 1 \end{bmatrix} \cdot \int_0^t \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} d\tau \right\} + u_0$$

$$u^* = \Theta \left\{ \begin{bmatrix} d_1 & d_2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 - e_{10} \\ e_2 - e_{20} \\ e_3 - e_{30} \end{bmatrix} + \frac{1}{T_3} \begin{bmatrix} d_1 & d_2 & 1 \end{bmatrix} \cdot \int_0^t \begin{bmatrix} \dot{e}_1 \\ \dot{e}_2 \end{bmatrix} d\tau \right\} + u_0$$

$$u^* = \mathcal{O} \left[d_1 \left(e_1 - e_{10} + \frac{1}{T_3} \int_0^t e_1 d\tau \right) + d_2 \left(e_2 - e_{20} + \frac{1}{T_3} \int_0^t e_2 d\tau \right) + \left(e_3 - e_{30} + \frac{1}{T_3} \int_0^t e_3 d\tau \right) \right]$$

Ve výpočtu se nám objevuje u_0 , které nám označuje počáteční podmínky systému. Ty na systém působí pouze na úplném počátku a dále se již neprojevují. V našem případě, tedy při řízení levitace v magnetickém poli, vždy vycházíme z nulových počátečních podmínek, tedy $u_0 = 0$.

6.2 Návrh klouzavého řízení

U této metody máme možnosti tři řízení. První je pomocí funkce signum (sign), která je vlastně dvoupolohová nespojitá regulace. Tato funkce má nevýhodu v neustálém přepínání, proto se může nahradit spojitou funkcí nasycení (sat). Pokud chceme zajistit hladké spojité řízení, pak použijeme třetí možnost a tou je funkce hyperbolický tangent (tgh). U všech tří způsobů je výpočet identický. Mění se pouze zvolená funkce.

$$u^* = U^m \text{sign}(m) + u_0$$

kde

$$m = \left[\mathbf{d}^T \dot{\mathbf{e}} + \mathbf{T}^{-1} \mathbf{d}^T \int_0^t \mathbf{e} d\tau \right].$$

Pak dostáváme řízení ve tvaru

$$u^{sl} = U^m \text{sign} \left([d_1 \quad d_2 \quad 1] \begin{bmatrix} e_1 - e_{10} \\ e_2 - e_{20} \\ e_3 - e_{30} \end{bmatrix} + \frac{1}{T_3} [d_1 \quad d_2 \quad 1] \cdot \int_0^t \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} d\tau \right) + u_0$$

$$u^{sl} = U^m \text{sign} \left[d_1 \left(e_1 - e_{10} + \frac{1}{T_3} \int_0^t e_1 d\tau \right) + d_2 \left(e_2 - e_{20} + \frac{1}{T_3} \int_0^t e_2 d\tau \right) + \left(e_3 - e_{30} + \frac{1}{T_3} \int_0^t e_3 d\tau \right) \right]$$

U^m určuje mezní hodnotu, tedy minimum/maximum,

Podobné řízení dostáváme také pro zmíněné funkce nasycení

$$u^{sat} = U^m \text{sat} \left\{ \mathcal{O}^m \left([d_1 \quad d_2 \quad 1] \begin{bmatrix} e_1 - e_{10} \\ e_2 - e_{20} \\ e_3 - e_{30} \end{bmatrix} + \frac{1}{T_3} [d_1 \quad d_2 \quad 1] \cdot \int_0^t \begin{bmatrix} \dot{e}_1 \\ \dot{e}_2 \end{bmatrix} d\tau \right) \right\} + u_0$$

$$u^{sat} = U^{msat} \left\{ \Theta^m \left[d_1 \left(e_1 - e_{10} + \frac{1}{T_3} \int_0^t e_1 d\tau \right) + d_2 \left(e_2 - e_{20} + \frac{1}{T_3} \int_0^t e_2 d\tau \right) + \left(e_3 - e_{30} + \frac{1}{T_3} \int_0^t e_3 d\tau \right) \right] \right\}$$

a hyperbolický tangent

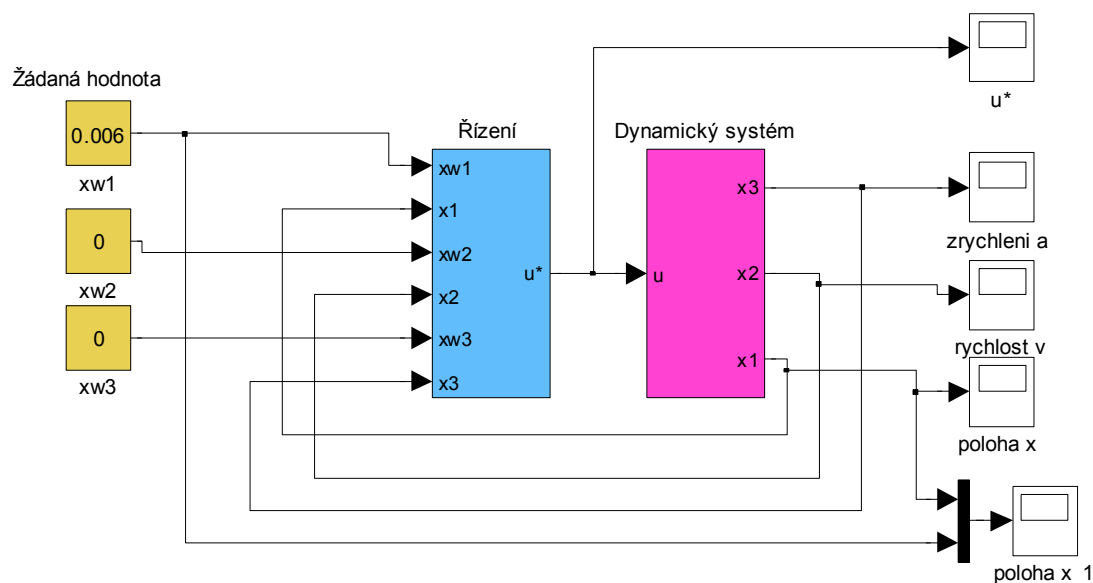
$$u^{tgh} = U^{mtgh} \left\{ \Theta^m \left([d_1 \quad d_2 \quad 1] \begin{bmatrix} e_1 - e_{10} \\ e_2 - e_{20} \\ e_3 - e_{30} \end{bmatrix} + \frac{1}{T_3} [d_1 \quad d_2 \quad 1] \cdot \int_0^t \begin{bmatrix} \dot{e}_1 \\ \dot{e}_2 \end{bmatrix} d\tau \right) \right\} + u_0$$

$$u^{tgh} = U^{mtgh} \left\{ \Theta^m \left[d_1 \left(e_1 - e_{10} + \frac{1}{T_3} \int_0^t e_1 d\tau \right) + d_2 \left(e_2 - e_{20} + \frac{1}{T_3} \int_0^t e_2 d\tau \right) + \left(e_3 - e_{30} + \frac{1}{T_3} \int_0^t e_3 d\tau \right) \right] \right\}$$

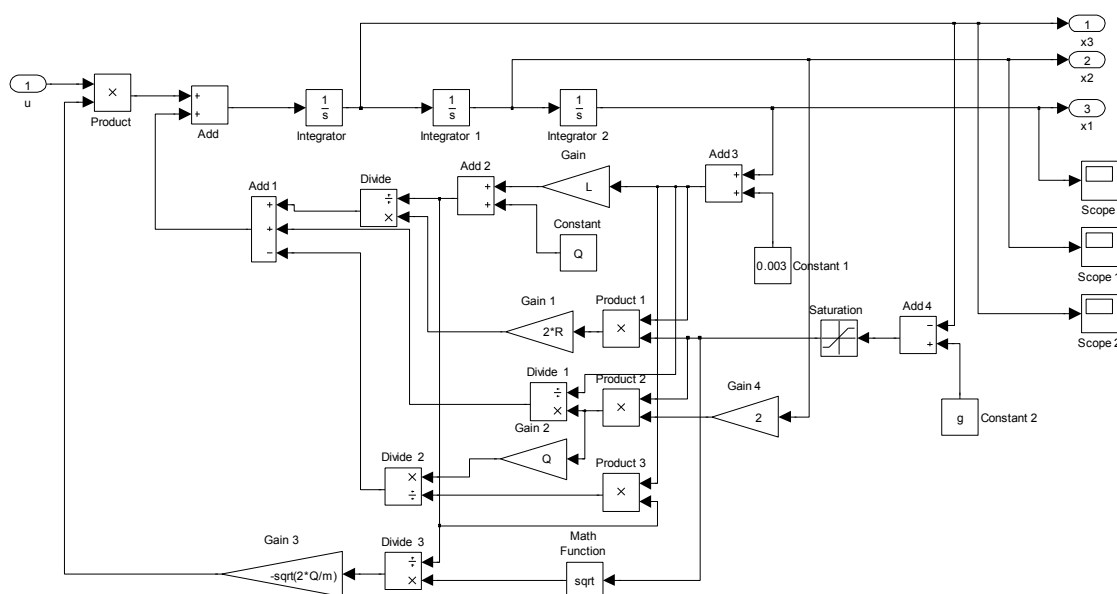
7 SIMULAČNÍ OVĚŘENÍ

Kapitola obsahuje simulační schémata jednotlivých navržených algoritmů řízení. Dále jsou popsány jednotlivé průběhy a vliv jednotlivých parametrů algoritmu na kvalitu řízení i na samotný algoritmus.

Celkové simulační schéma se skládá z vstupních žádaných hodnot a dvou subsystémů, a to řízení a dynamického systému. Propojení simulačního schématu můžeme vidět na Obr. 8. Simulační schéma subsystému dynamické soustavy respektive modelu levitace na Obr. 9.



Obr. 8 Simulační schéma regulace polohy tělesa



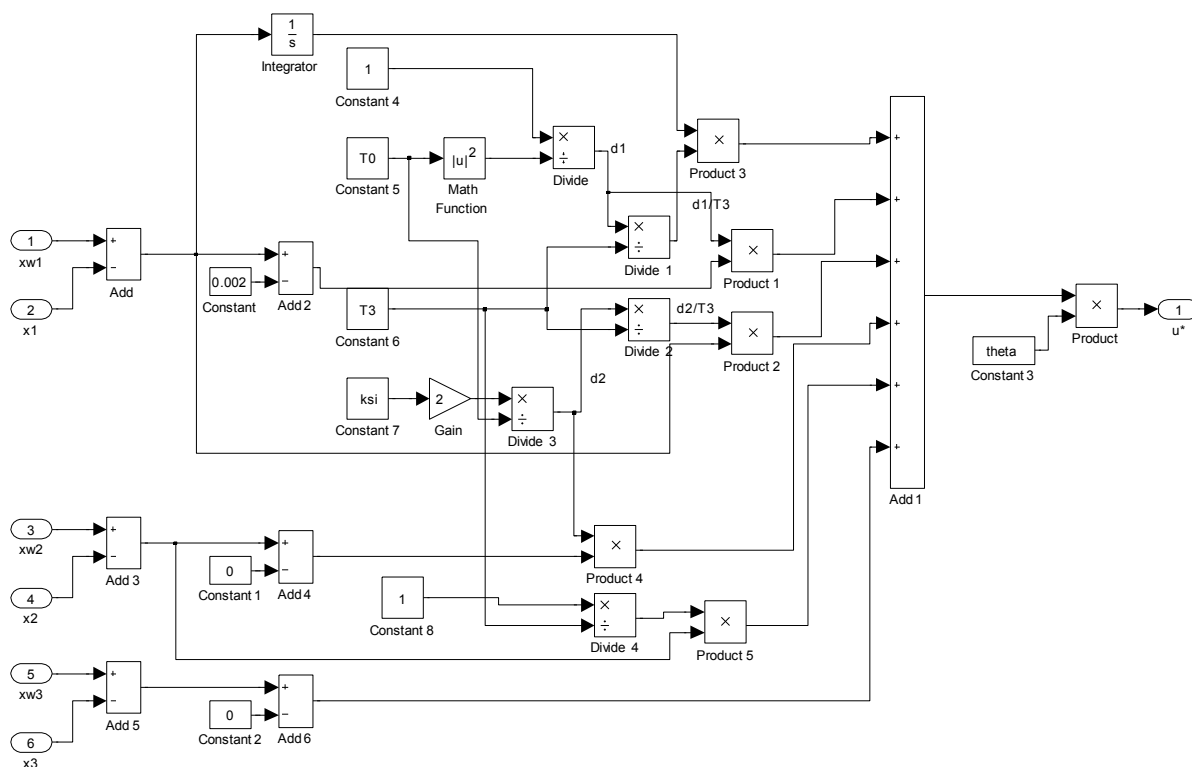
Obr. 9 Simulační schéma dynamického subsystému

Hodnoty simulované soustavy

$m=0,76$ kg	hmotnost tělesa
$R=32,78$ Ω	odpor cívky
$Q=0,00064$	konstanta elektromagnetu
$L=0,5$	konstanta elektromagnetu
$g=9,81$	gravitační zrychlení

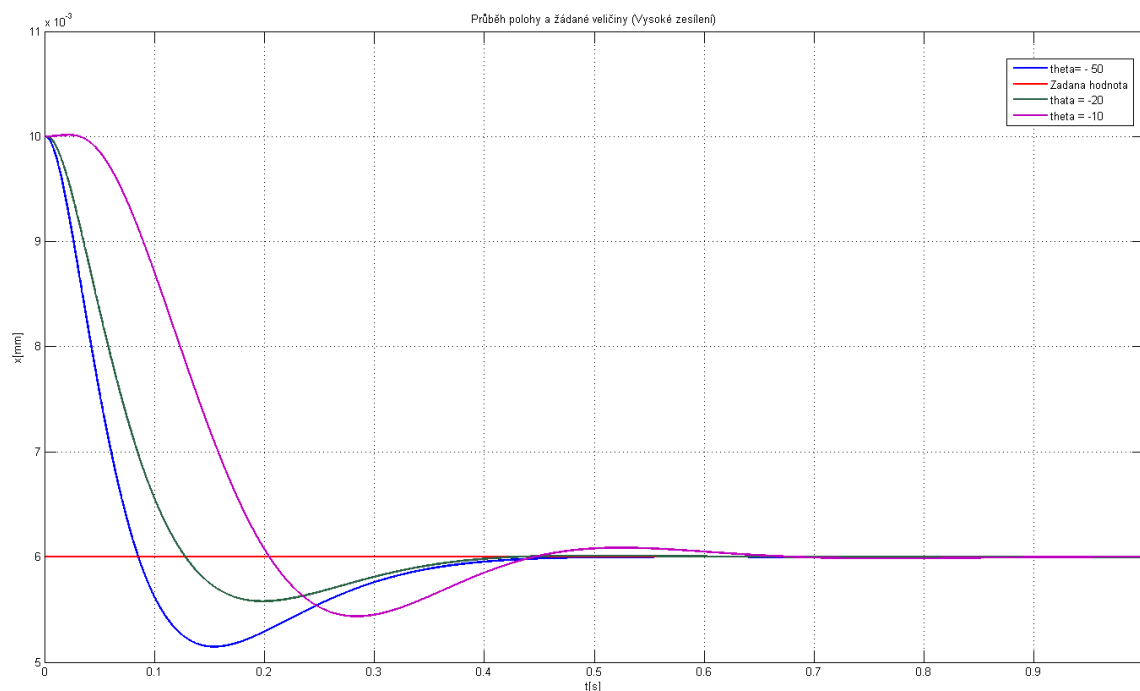
7.1 Robustní řízení s vysokým zesílením

V blokovém zapojení vidíme blok θ (theta), který bude s časovými konstantami T_0 , T_3 výrazně ovlivňovat průběh řízení.

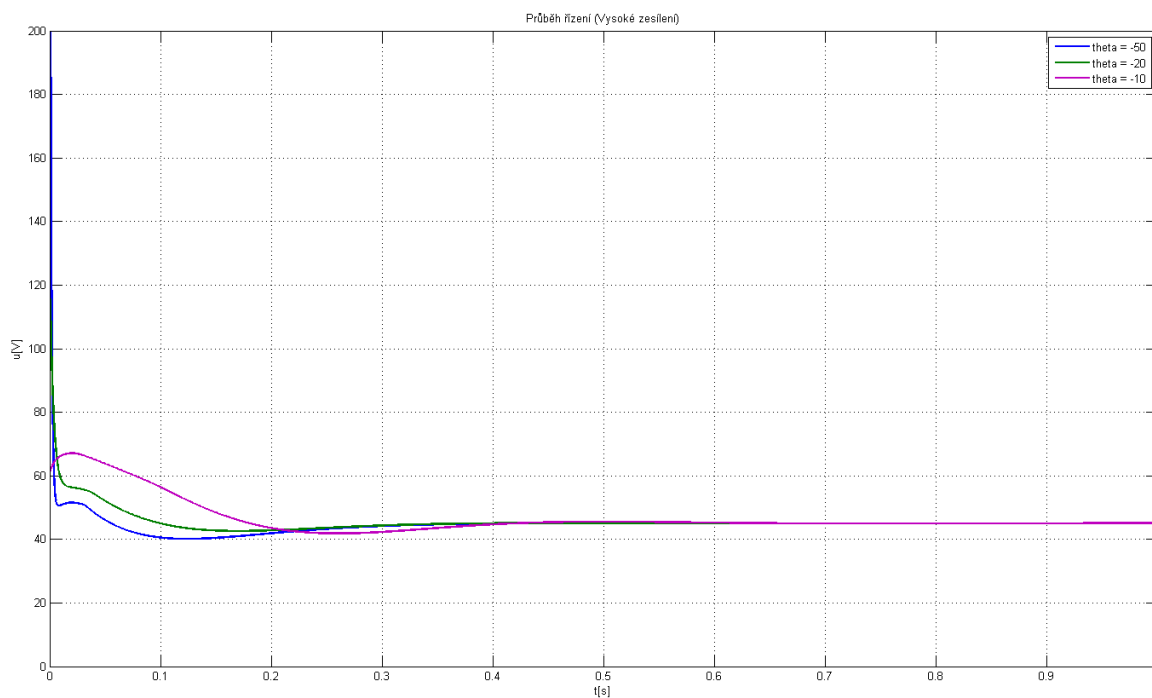


Obr. 10 Simulační schéma subsystému řízení

Optimální hodnoty: $T_0 = 0.06s, T_3 = 0.03s, \theta = -50$



Obr. 11 Průběhy polohy pro různé velikosti θ

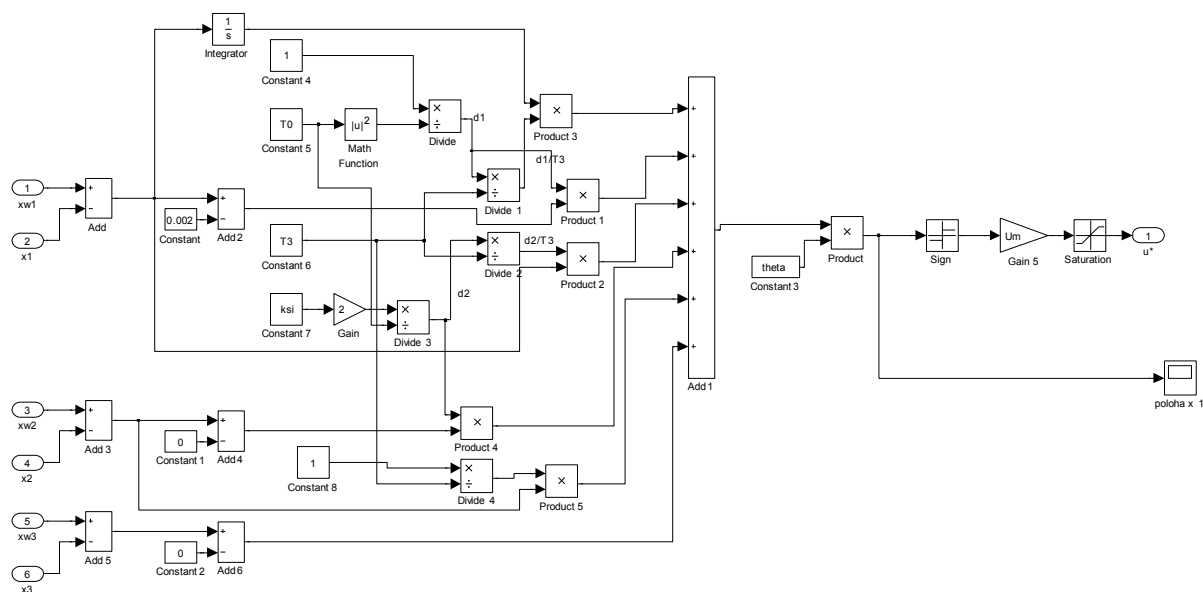


Obr. 12 Průběhy řízení pro různé velikosti θ

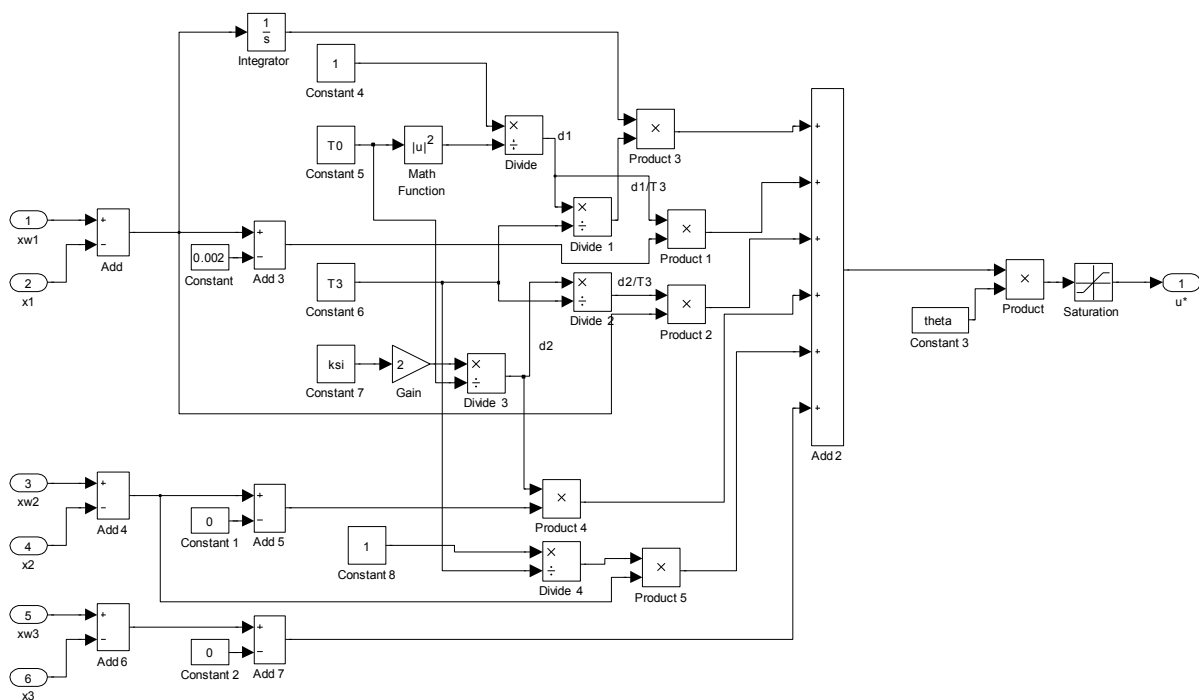
U vysokého zesílení se zvětšováním časových konstant T_0 , T_3 prodlužovala doba dosažení žádané veličiny. Pokud snižujeme hodnotu T_3 , pak se dostáváme rychleji na žádanou hodnotu. V grafu vidíme, jak se mění průběh polohy a řízení, na změnu θ

7.2 Robustní řízení v klouzavém režimu

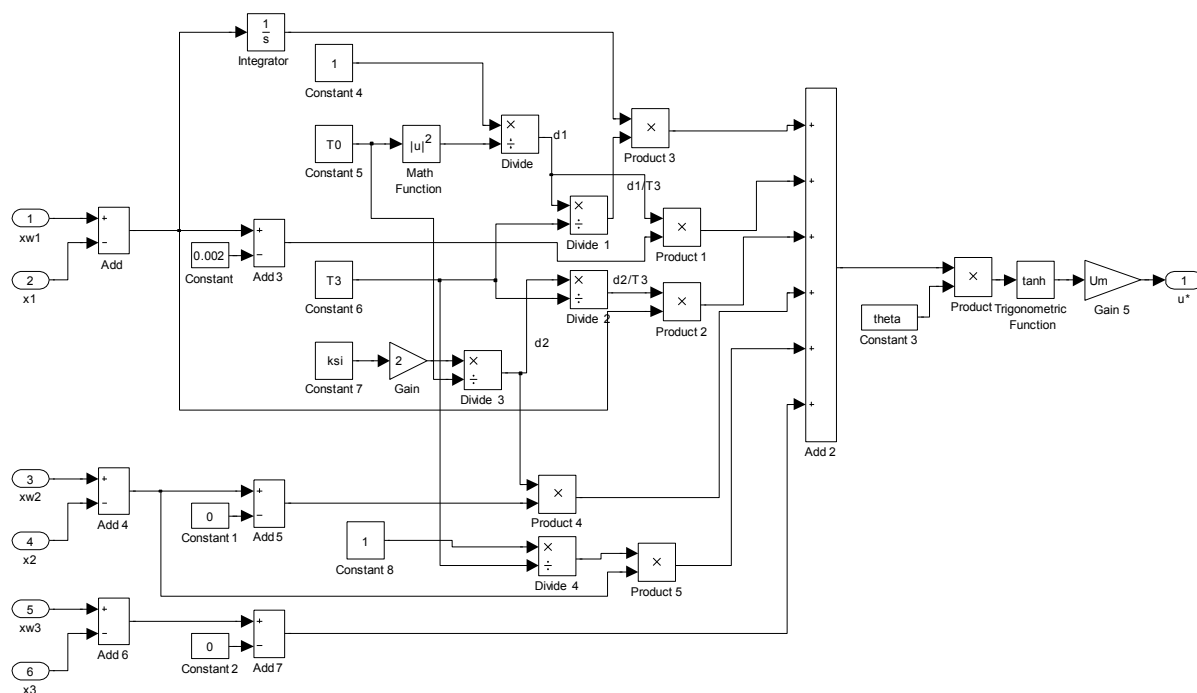
V tomto případě existují tři různá zapojení, a to s funkcí signum, nasycení a hyperbolický tangent. Výsledné průběhy budou vykresleny do jednoho grafu.



Obr. 13 Subsystém řízení v klouzavém režimu funkce signum



Obr. 14 Subsystém řízení v klouzavém režimu funkce nasycení

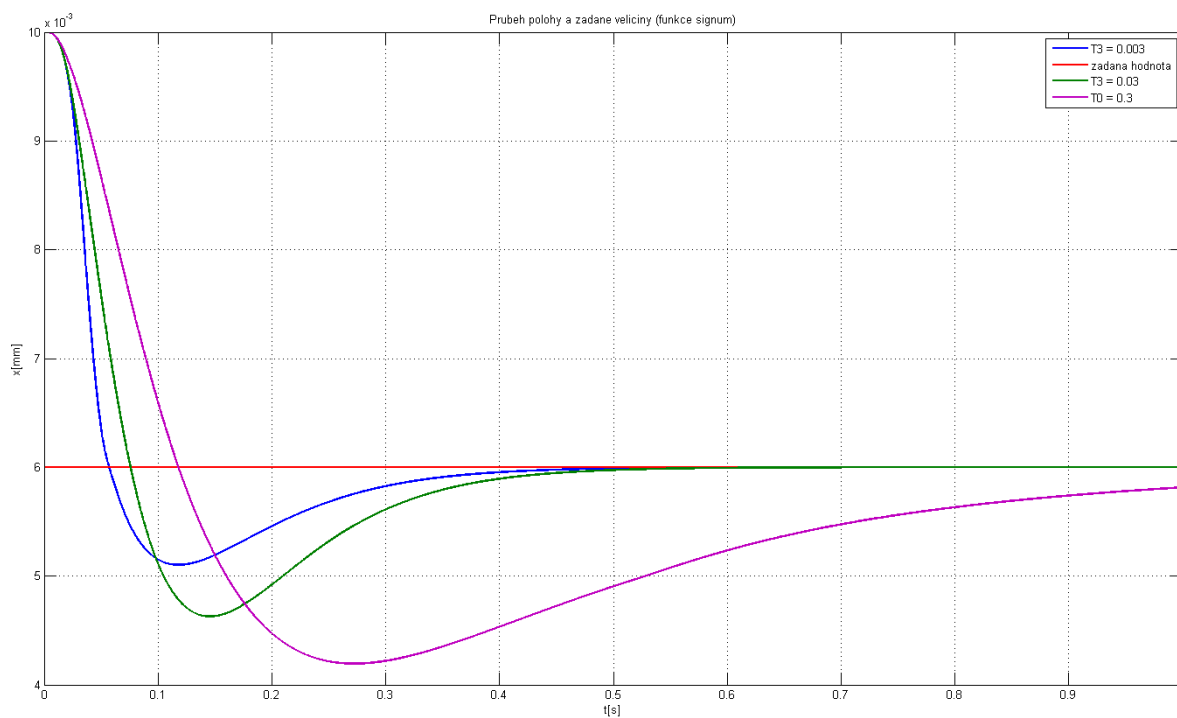


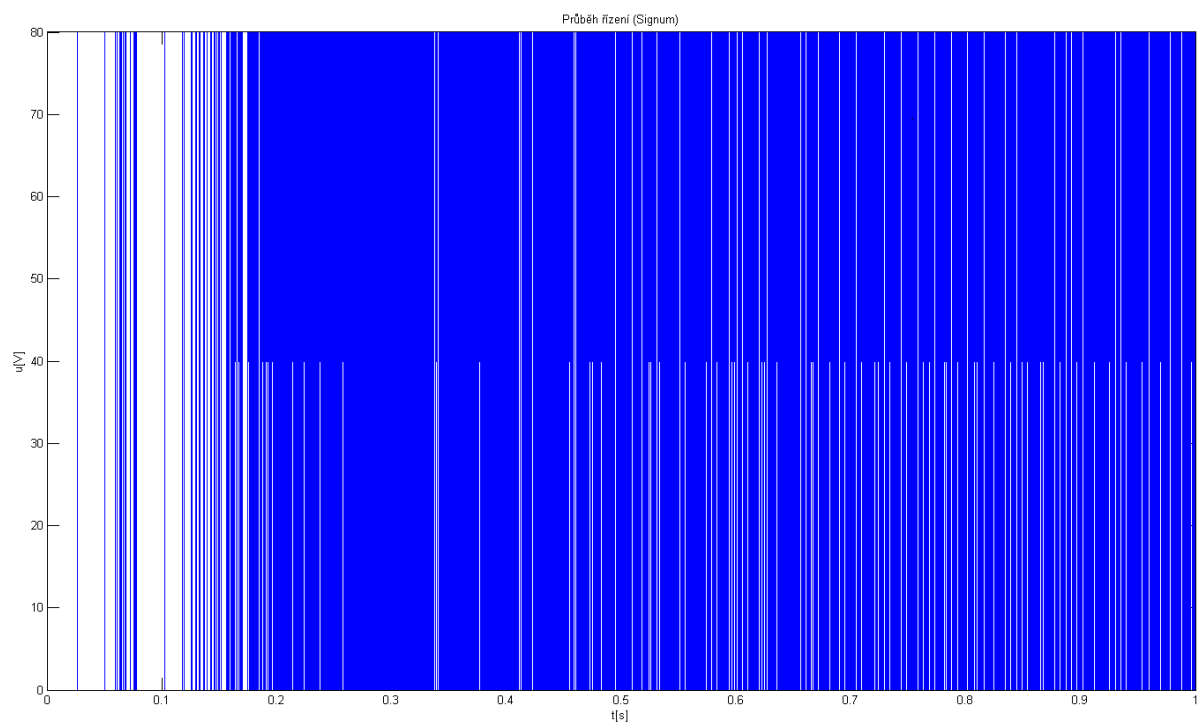
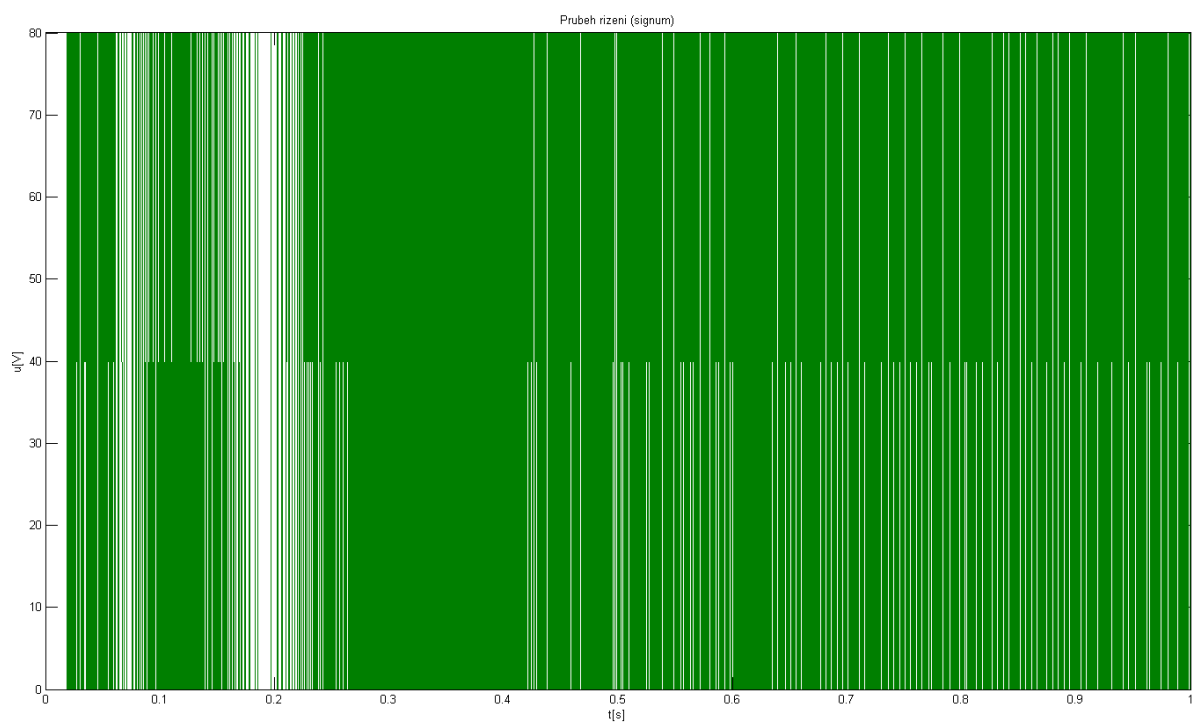
Obr. 15 Subsystem řízení v klouzavém režimu s funkcí hyperbolický tangens

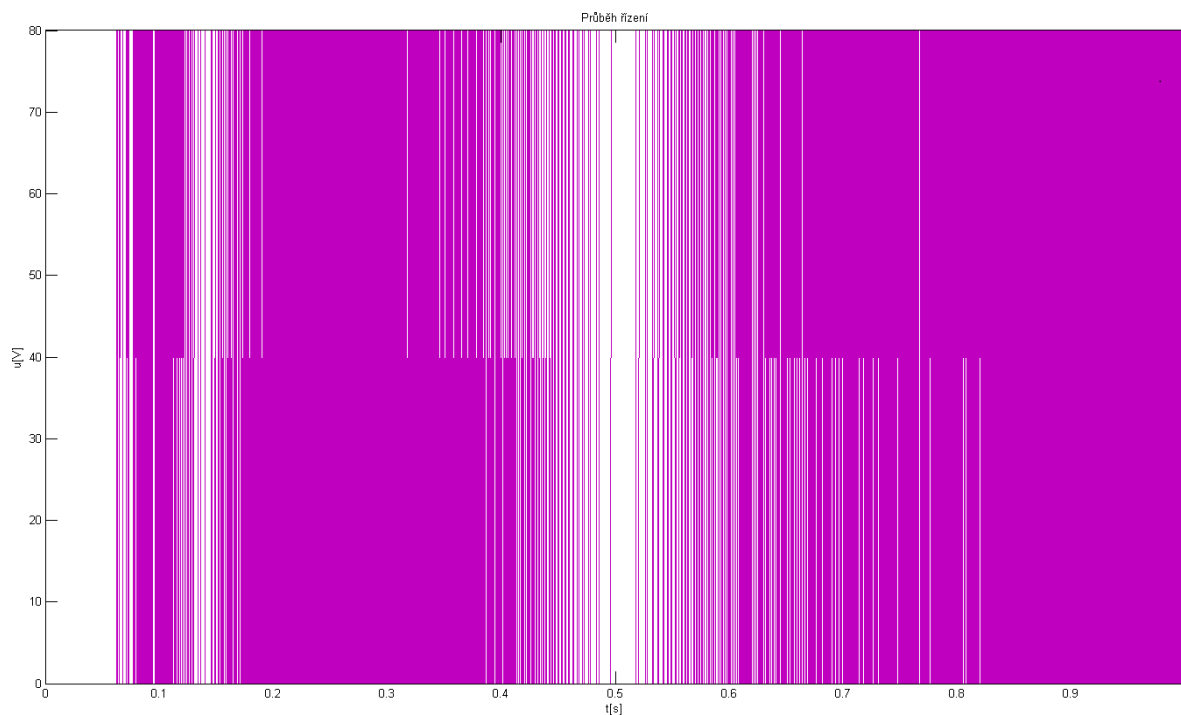
Z blokových schémat je patrné, že průběhy jednotlivých zapojení ovlivňovat budou ovlivňovat časové konstanty T_0 , T_3 také hodnota θ a mezní hodnota U^m .

Funkce signum

Optimální hodnoty konstant: $T_0 = 0.03s$, $T_3 = 0.003s$, $\theta = 1$

Obr. 16 Průběh polohy pro různé T_3

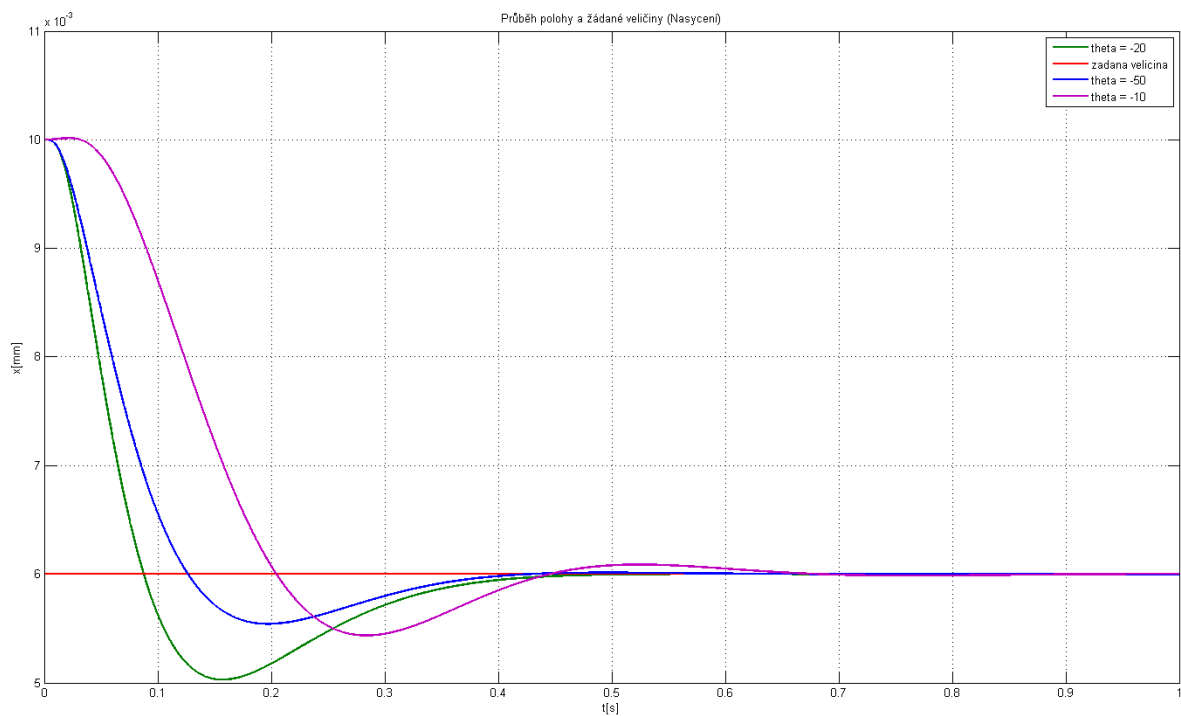
Obr. 17 Průběh řízení $T_3 = 0,003$ sObr. 18 Průběh řízení $T_3 = 0,03$ s

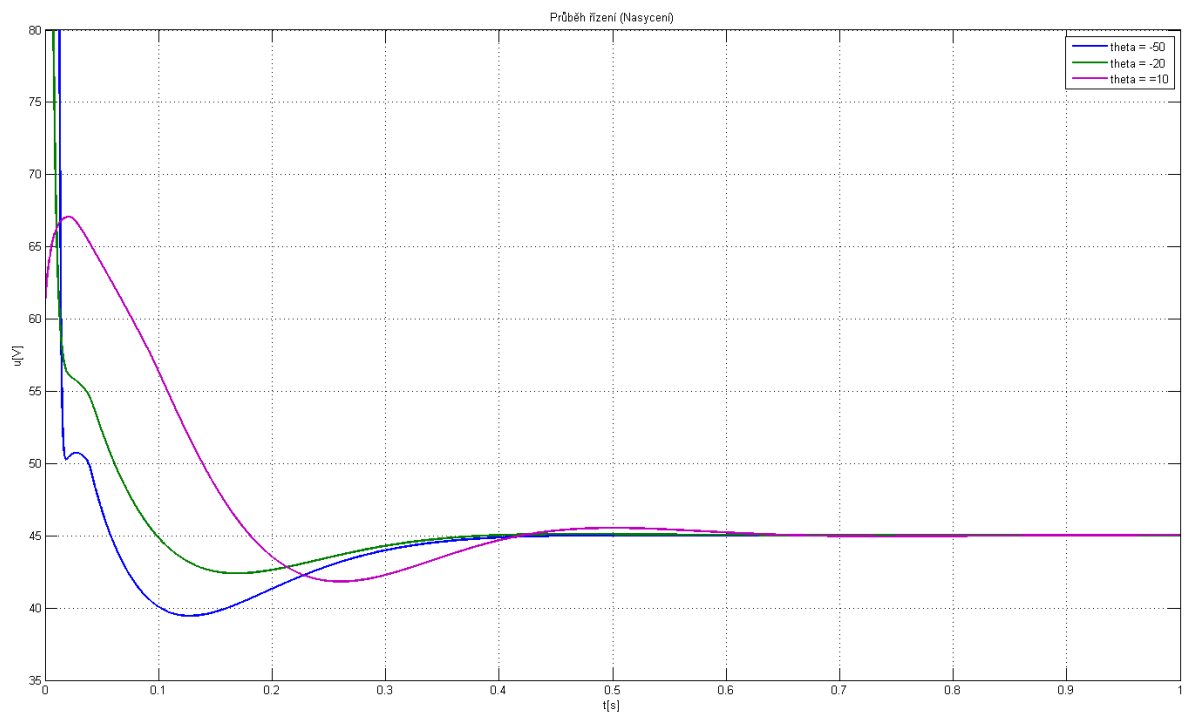
Obr. 19 Průběh řízení $T_3 = 0,3$ s

Z průběhu polohy vidíme, že konstanta T_3 nám ovlivňuje dobu ustálení, zde konstanta θ nemá žádný vliv, protože u funkce signum vždy nabývá hodnoty 1.

Funkce nasycení

Optimální hodnoty: $T_0 = 0,06$ s, $T_3 = 0,03$, $\theta = -50$

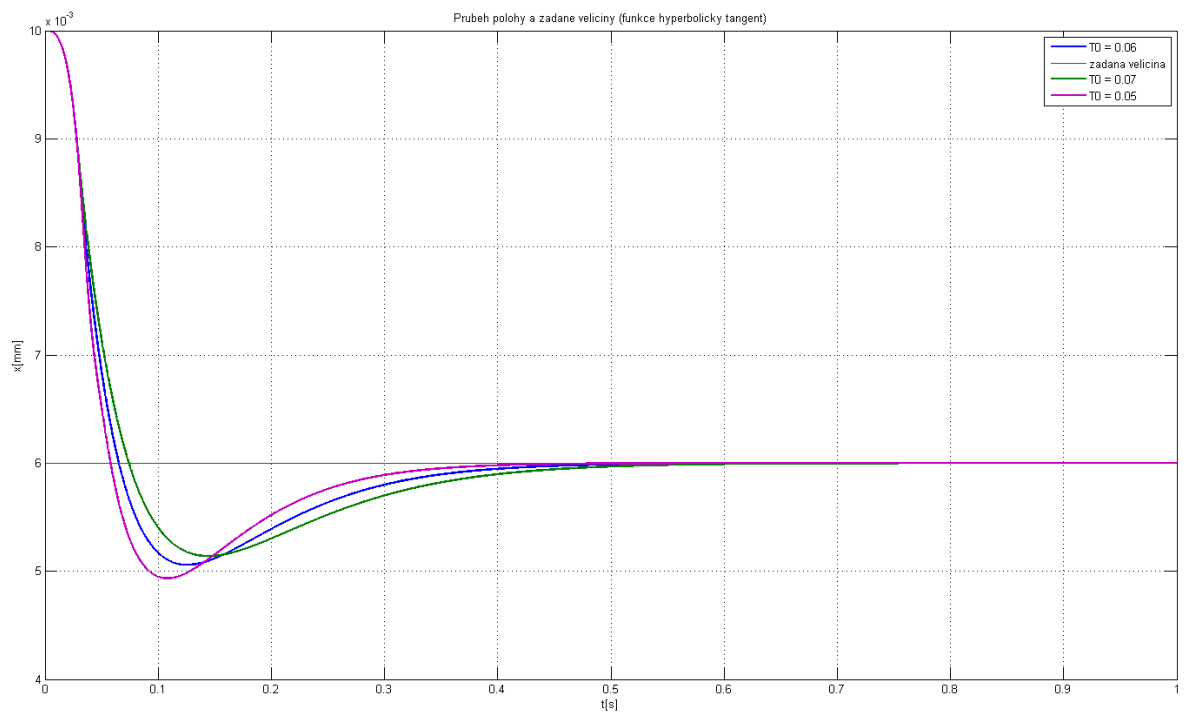
Obr. 20 Průběh polohy pro různá θ

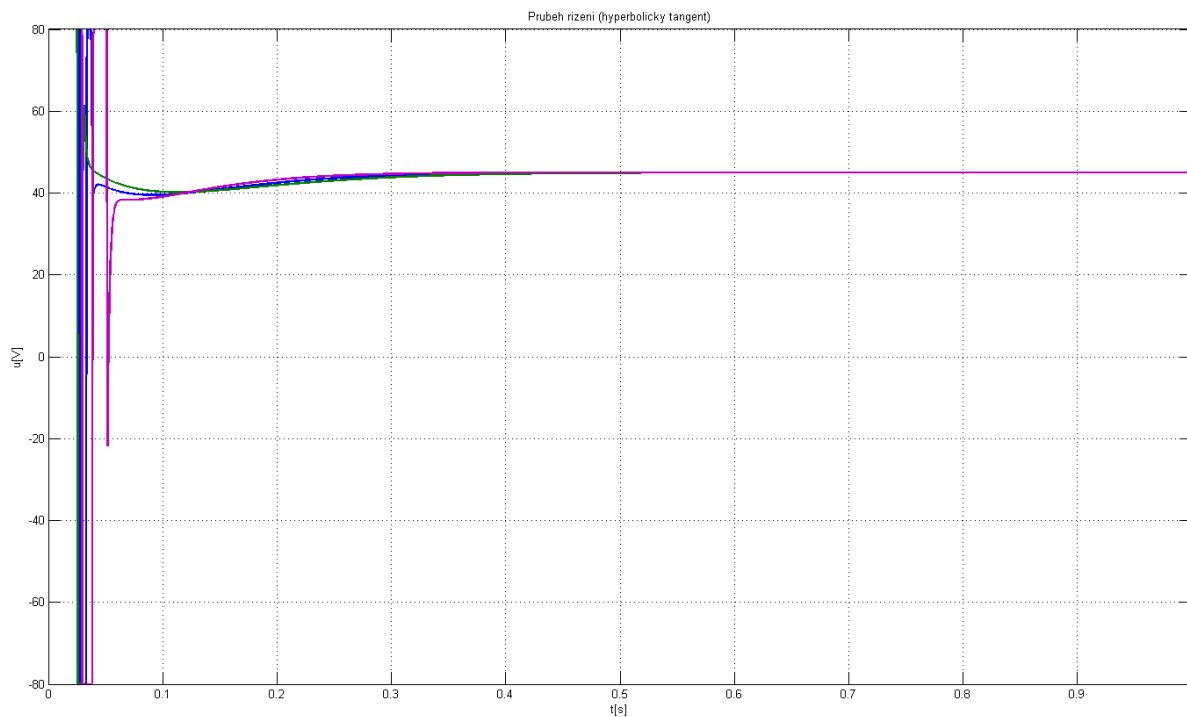
Obr. 21 Průběh řízení pro různá θ

U funkce nasycení se nejvíce projevuje konstanta θ , která čím je menší tím nám více rozkmitává průběh polohy. Časové konstanty T_0 , T_3 zde mají vliv na výslednou dobu ustálení.

Funkce hyperbolický tangent

Optimální hodnoty: $T_0 = 0,06\text{s}$, $T_3 = 0,002\text{s}$, $\theta = -5$

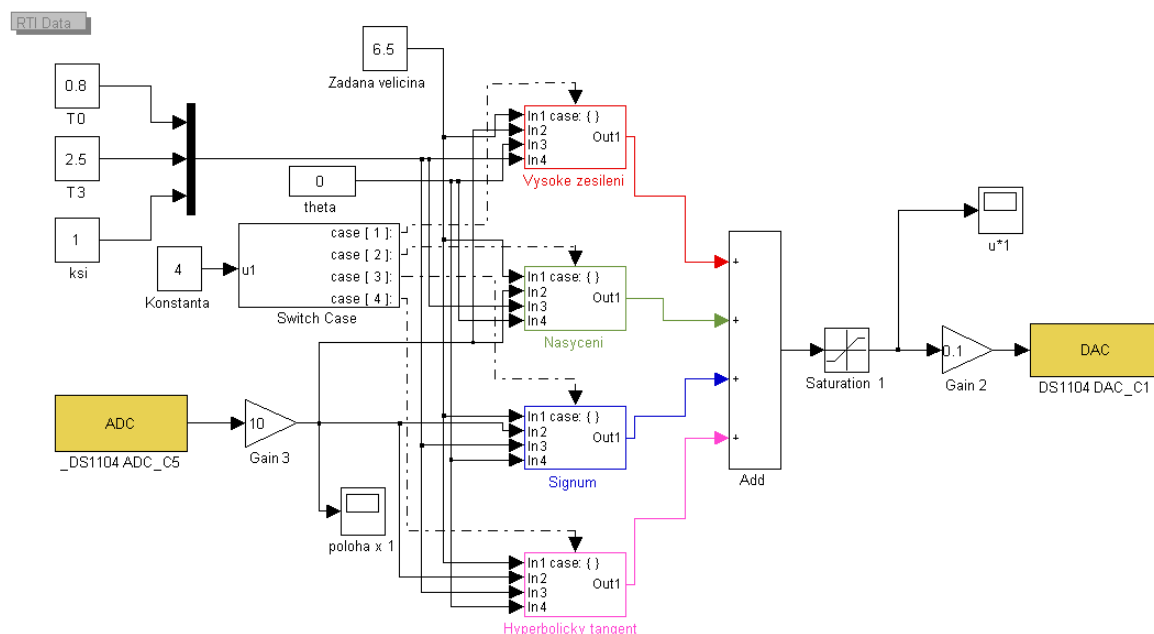
Obr. 22 Průběh polohy pro různá T_0

Obr. 23 Průběh řízení pro různá T_0

Funkce hyperbolický tangent je velmi citlivý na změny časových konstant T_0 , T_3 . Vliv konstanty θ nemá velký vliv na změny průběhu polohy.

8 OVĚŘENÍ ALGORITMŮ NA REÁLNÉM MODELU

Kapitola se zabývá aplikací algoritmů řízení na reálný model levitace. Dříve byly znázorněny průběhy simulace levitace. Nyní se však bude jednat o propojení s reálným systémem, a tudíž lze předpokládat jiné průběhy i hodnoty parametrů.



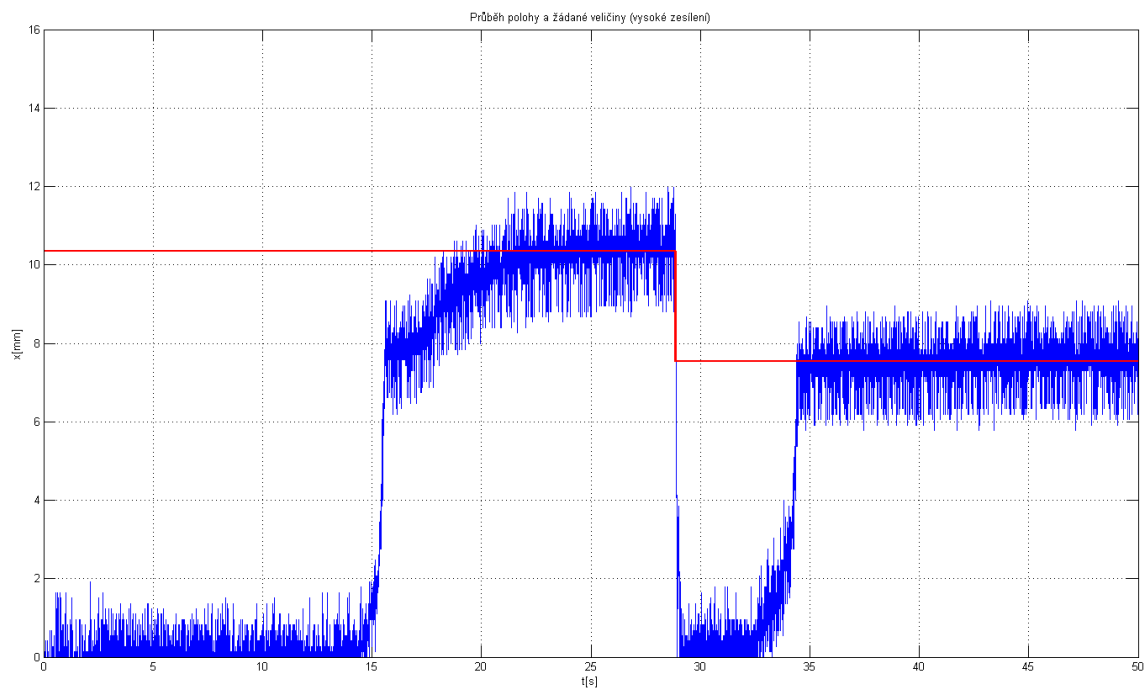
Obr. 24 Propojení algoritmů řízení s reálným modelem

Propojení algoritmů s reálným modelem je umožněno pomocí vstupu (DAC) a výstupu (ADC), které najdeme ve speciální knihovně MATLAB/Simulink/dSPACE RTI1104 pro řídicí kartu DS1104. Schéma soustavy je navrženo tak, aby konstanty řídicích algoritmů byly mimo jejich subsystém. Přepínání mezi různými algoritmy je řešeno pomocí bloku Switch Case. Do tohoto bloku vstupuje konstanta, která určuje, jakým algoritmem budeme řídit model levitace. Konstanta nastavená na číslo jedna odpovídá vysokému zesílení, dva odpovídá funkci nasycení, tři znaménkové funkci signum, a čtvrtá nám nastaví funkci hyperbolický tangent. Konstanty vstupující do řídicích algoritmů jsou žádaná veličina, časové konstanty T_0 , T_3 , konstanta tlumení ξ , a hodnota adaptační matice θ . Blok DAC nám převádí z digitálního vstupu -1 až 1 na analogové výstupní napětí -10V až 10V na řídicí kartu DS1104. Blok ADC, nám převádí z řídicí karty DS1104 analogové vstupní napětí -10V až 10V na digitální výstup -1 až 1.

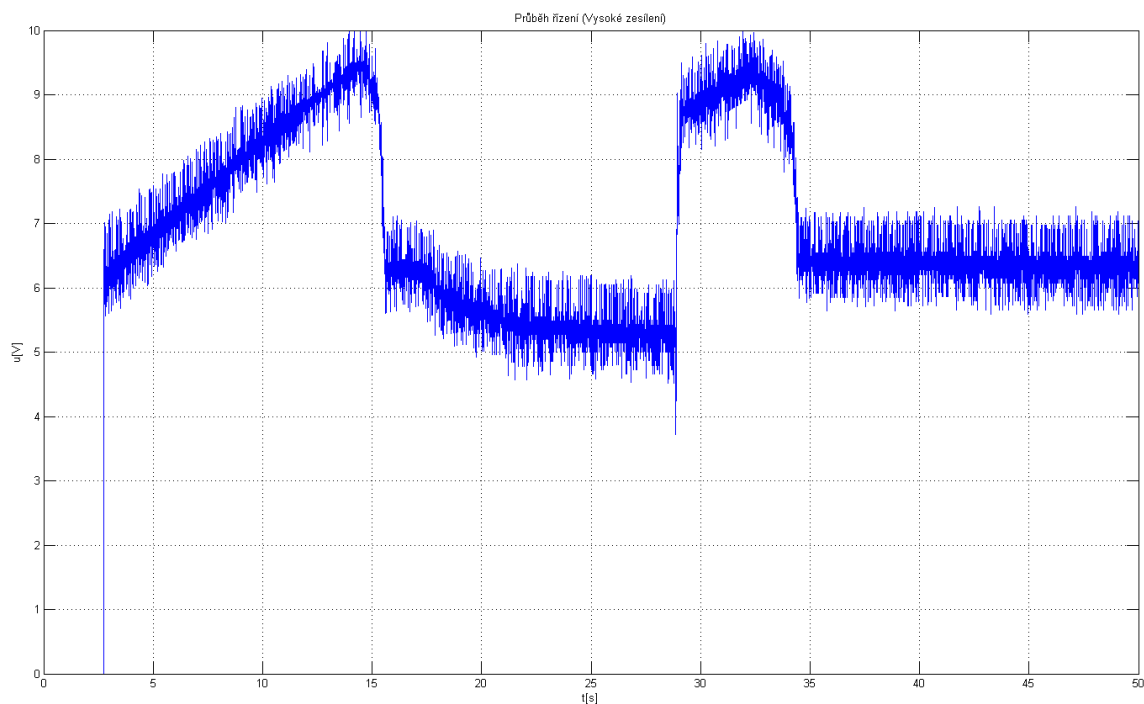
8.1 Průběhy jednotlivých reálných režimů řízení

Stejně jako u předchozí kapitoly jsou zde uvedeny výsledné průběhy řízení levitace v magnetickém poli. Je zde potřeba zmínit, že se jedná o starší model, a tím pádem byly výsledky průběhů značně ovlivněny hlavně zahříváním elektromagnetu a tento fakt vedl ke změnám jeho parametrů. Proto docházelo k odlišným průběhům, i při zachování stejných hodnot konstant. A to vedlo ke špatnému hledání optimálních hodnot.

Vysoké zesílení



Obr. 25 Průběh polohy a žádané veličiny (Vysoké zesílení)



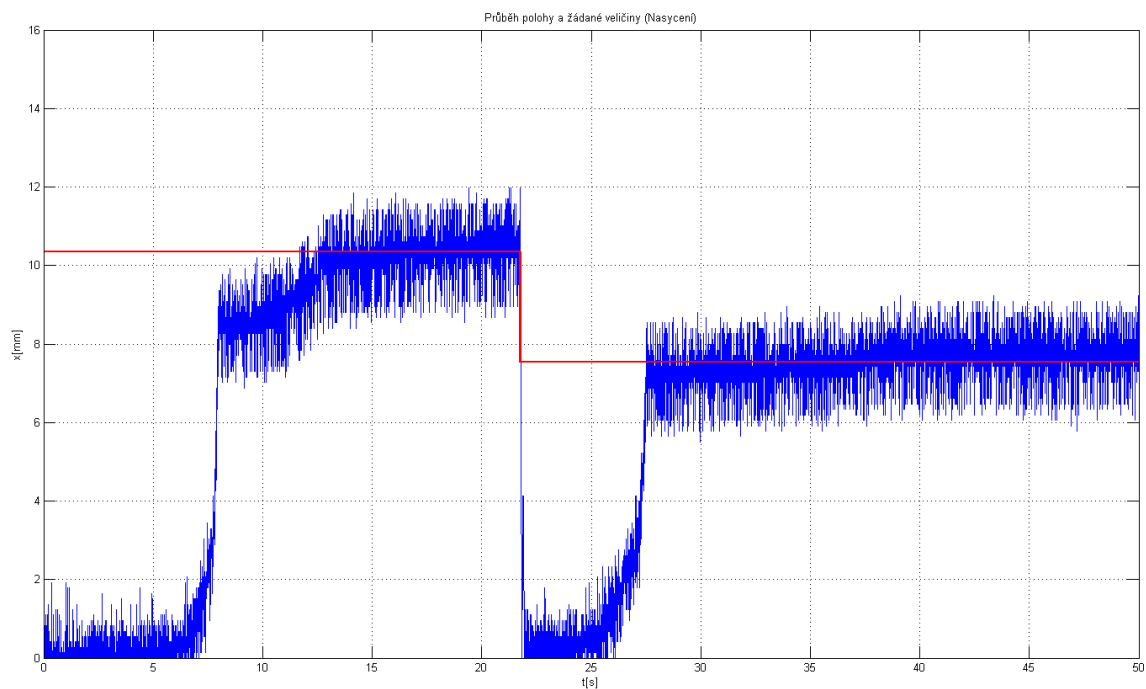
Obr. 26 Průběh řízení (Vysoké zesílení)

U vysokého zesílení je zřejmé, že oproti simulačnímu průběhu řízení, je u reálné soustavy jeho akční zásah omezen na rozmezí 0-10V. Proto nemůže dosahovat větších akčních zásahů. Z výsledných průběhů vidíme robustnost navrženého algoritmu.

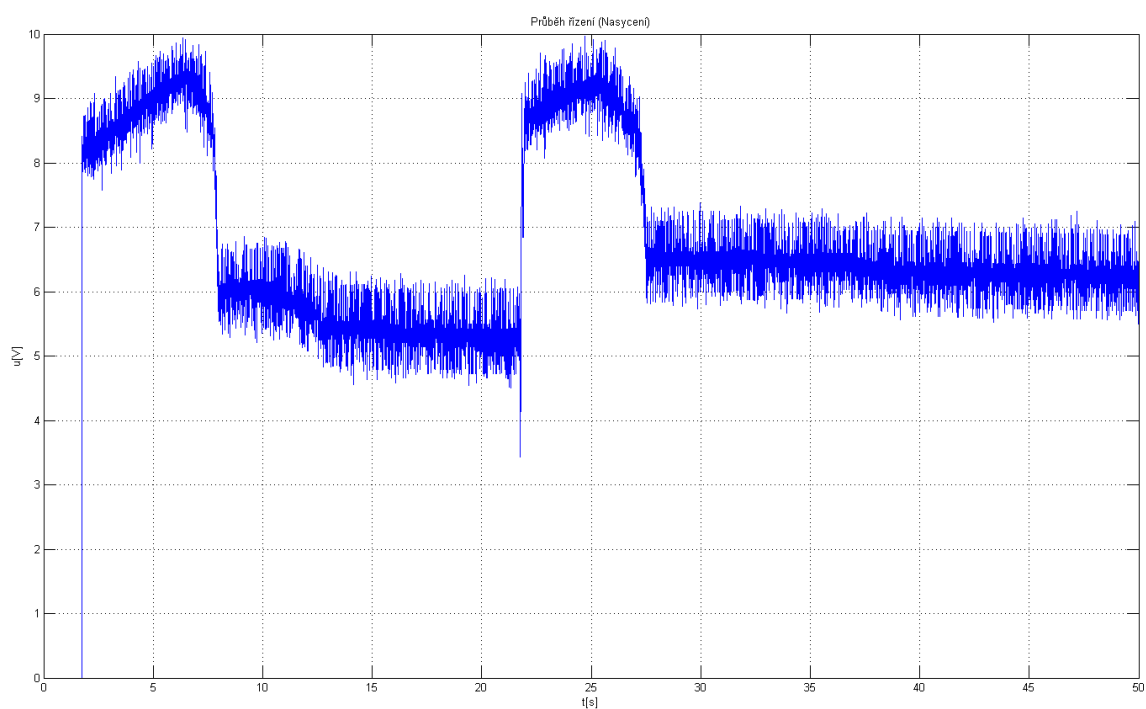
Funkce signum

U této funkce se nepovedlo nastavit konstanty tak, aby algoritmus řízení dosáhl požadované hodnoty. Příčin neúspěchu může být více, ať už stářím modelu, silně nelineárním systémem, rychlou metodou řízení nebo tím že funkce signum je omezena v rozmezí 0 až 10V a chybí jí větší rozsah napětí, aby se počítalo i s její setrvačností.

Funkce nasycení



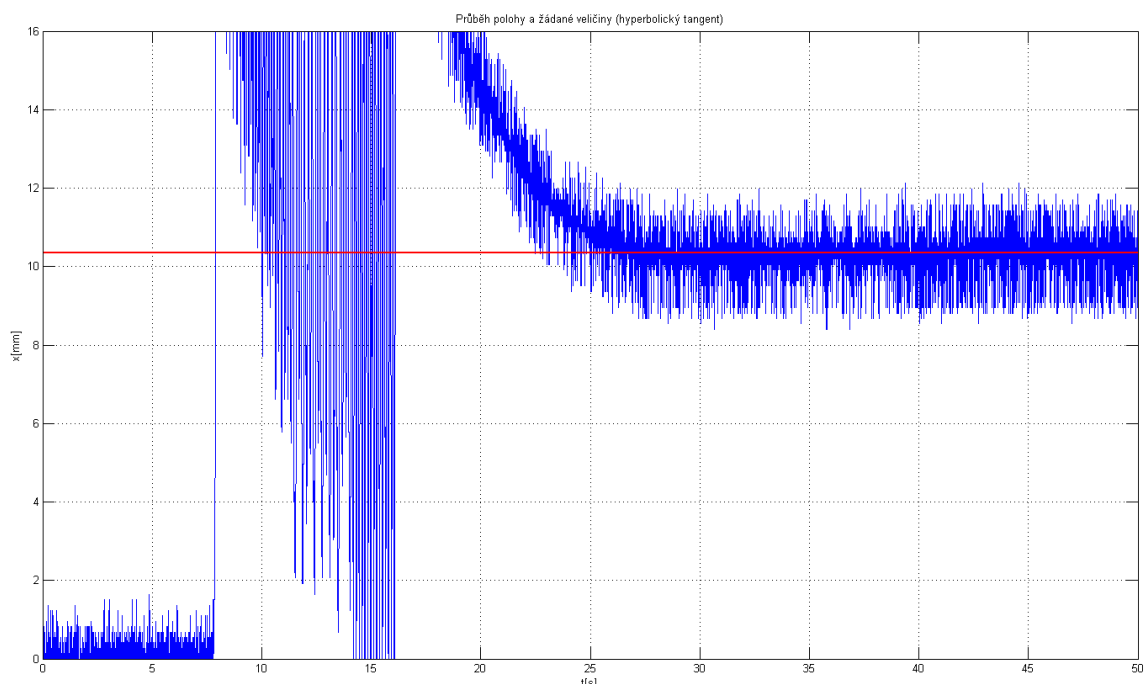
Obr. 27 Průběh polohy a žádané veličiny (funkce nasycení)



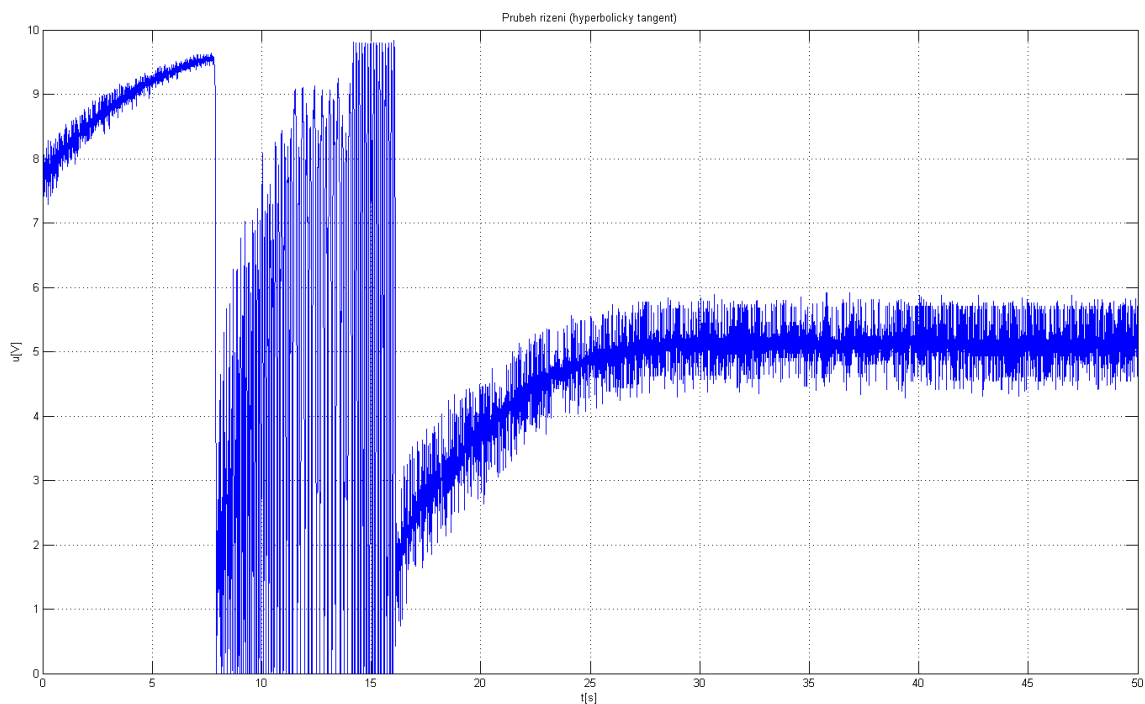
Obr. 28 Průběh řízení (funkce nasycení)

Funkce nasycení, je omezena v rozsahu 0-10V. Algoritmus reaguje dobře na změnu požadované hodnoty. Jeho parametry i průběhy jsou totožné s vysokým zesílením, je to zapříčiněno tím, že se u vysokého zesílení dává funkce nasycení, abychom omezily jeho velký akční zásah na rozsah spínání elektromagnetu a to 0-10V.

Funkce hyperbolický tangent



Obr. 29 Průběh polohy a žádané veličiny (funkce hyperbolický tangent)



Obr. 30 Průběh řízení (funkce hyperbolický tangent)

Funkce hyperbolický tangent se liší od předchozích robustních algoritmů tím, že se levitující klapka přibližuje požadované hodnotě ze sepnuté, tudíž maximální polohy, oproti ostatním, kde se blíží z počáteční polohy. Ostatně vše vidíme na průběhu řízení, kde akční veličina zvyšuje své napětí, a tím postupně levitující klapka zmenšuje polohu

k požadované hodnotě. Podle průběh vidíme, že se jedná o robustní řízení. Nastavení konstant, bylo problematické, jelikož je algoritmus velmi citlivý na nepatrně malé změny hodnot.

8.2 Parametry použité pro jednotlivé algoritmy

V této kapitole si uvedeme nastavení parametrů pro jednotlivé algoritmy řízení

Použité parametry pro řízení

Vysoké zesílení

$w = 10,3 \text{ mm}$	žádaná poloha tělesa
$\theta = 5$	adaptační matice
$T_0 = 0,8 \text{ s}$	časová konstanta
$T_3 = 2,5 \text{ s}$	časová konstanta
$\xi = 1$	Koeficient poměrného tlumení

Funkce nasycení

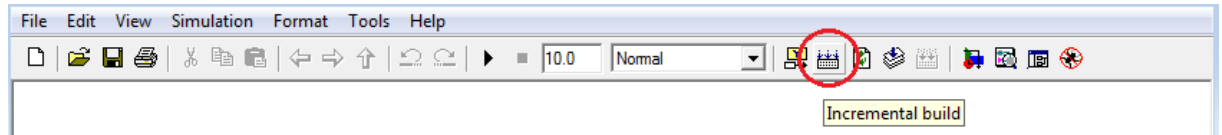
$w = 10,3 \text{ mm}$	žádaná poloha tělesa
$\theta = 5$	adaptační matice
$T_0 = 0,8 \text{ s}$	časová konstanta
$T_3 = 2,5 \text{ s}$	časová konstanta
$\xi = 1$	Koeficient poměrného tlumení

Funkce hyperbolický tangent

$w = 10,3 \text{ mm}$	žádaná poloha tělesa
$\theta = 0,2$	adaptační matice
$T_0 = 1 \text{ s}$	časová konstanta
$T_3 = 0,5 \text{ s}$	časová konstanta
$\xi = 1$	Koeficient poměrného tlumení

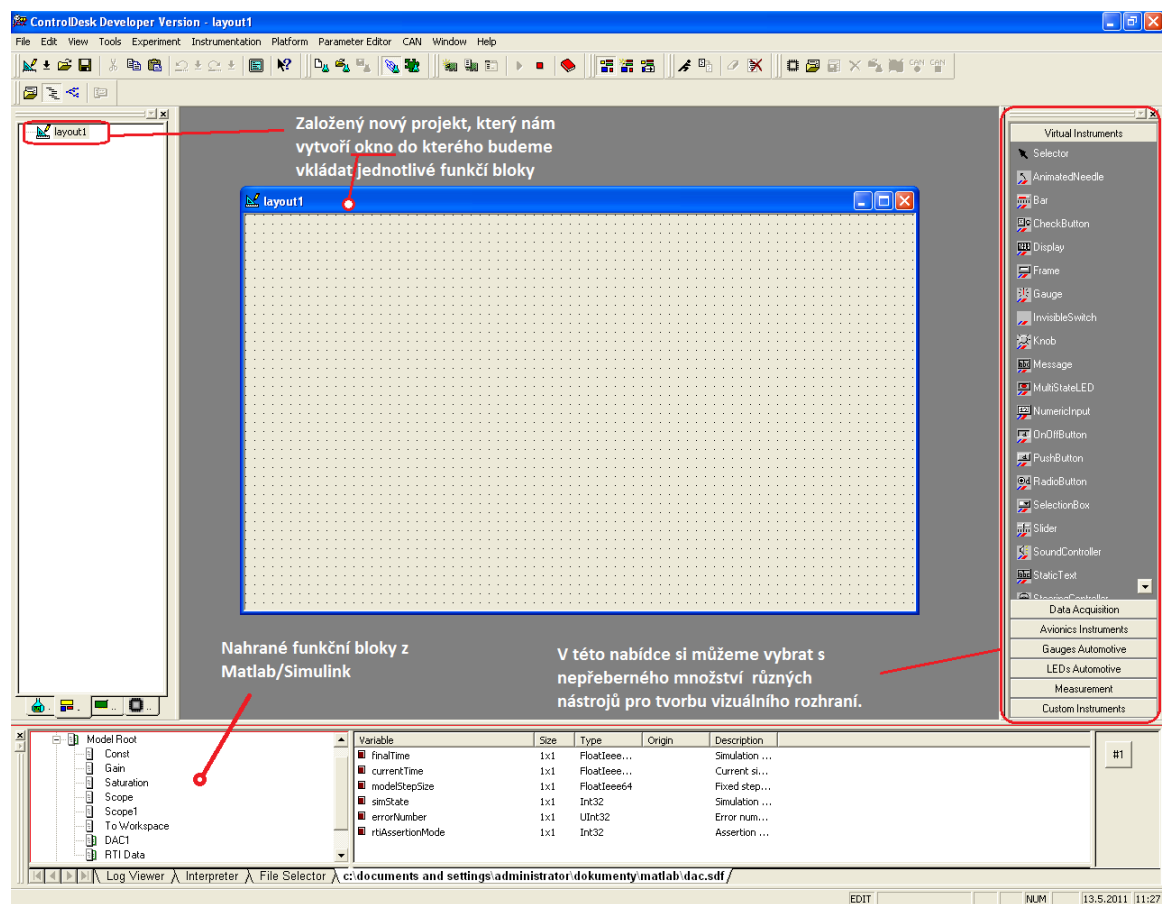
9 VYTVOŘENÍ PROSTŘEDÍ V PROGRAMU CONTROLDESK

V této kapitole se budeme zabývat vytvořením uživatelského prostředí v programu ControlDesk. Pro vytvoření funkční aplikace potřebujeme mít vytvořené řídicí algoritmy v programu Matlab/Simulink, které nahrajeme na řídicí kartu DS1104.



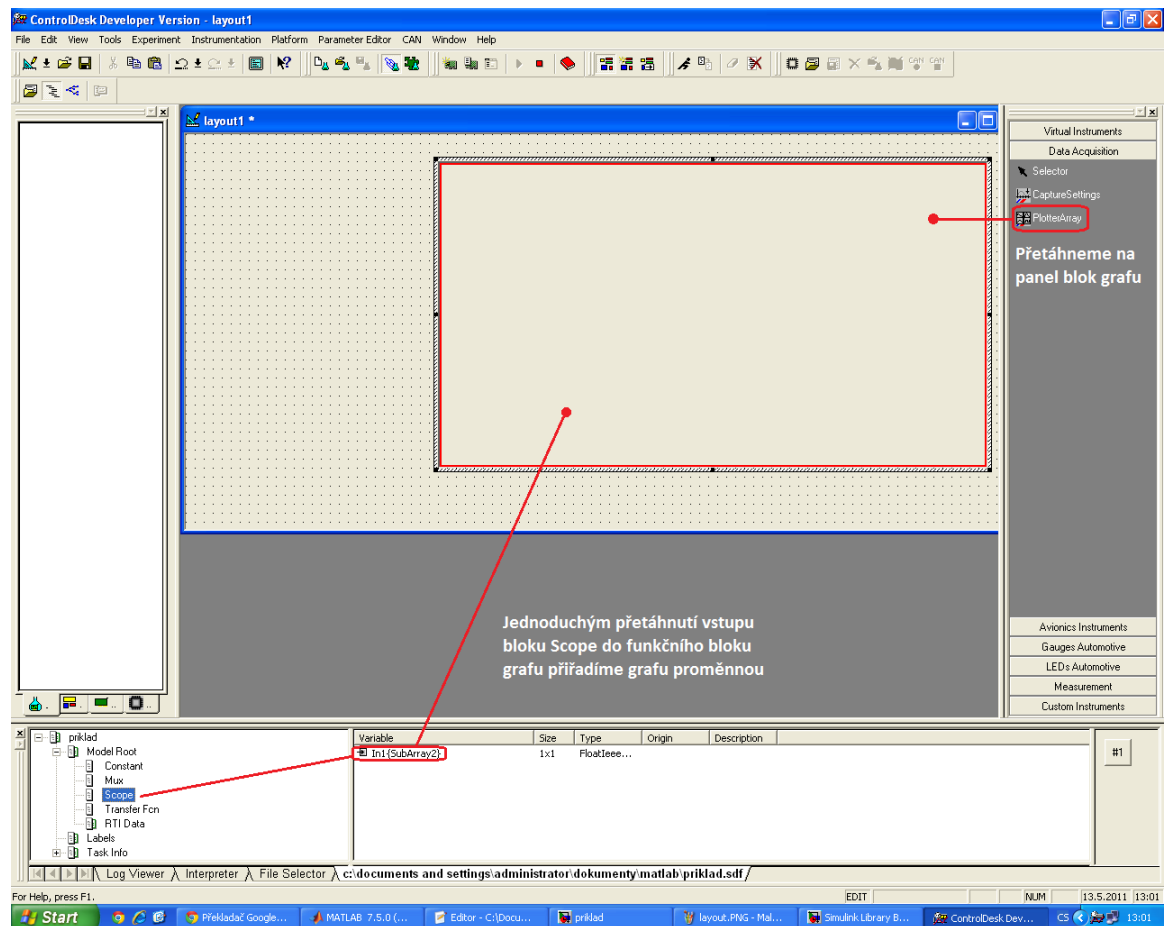
Obr. 31 Nahrání modelu na řídicí kartu DS1104

Poté si spustíme program ControlDesk, ve kterém si vytvoříme nový experiment, do kterého pak můžeme vkládat soubory, které chceme nahrát při otevření experimentu.



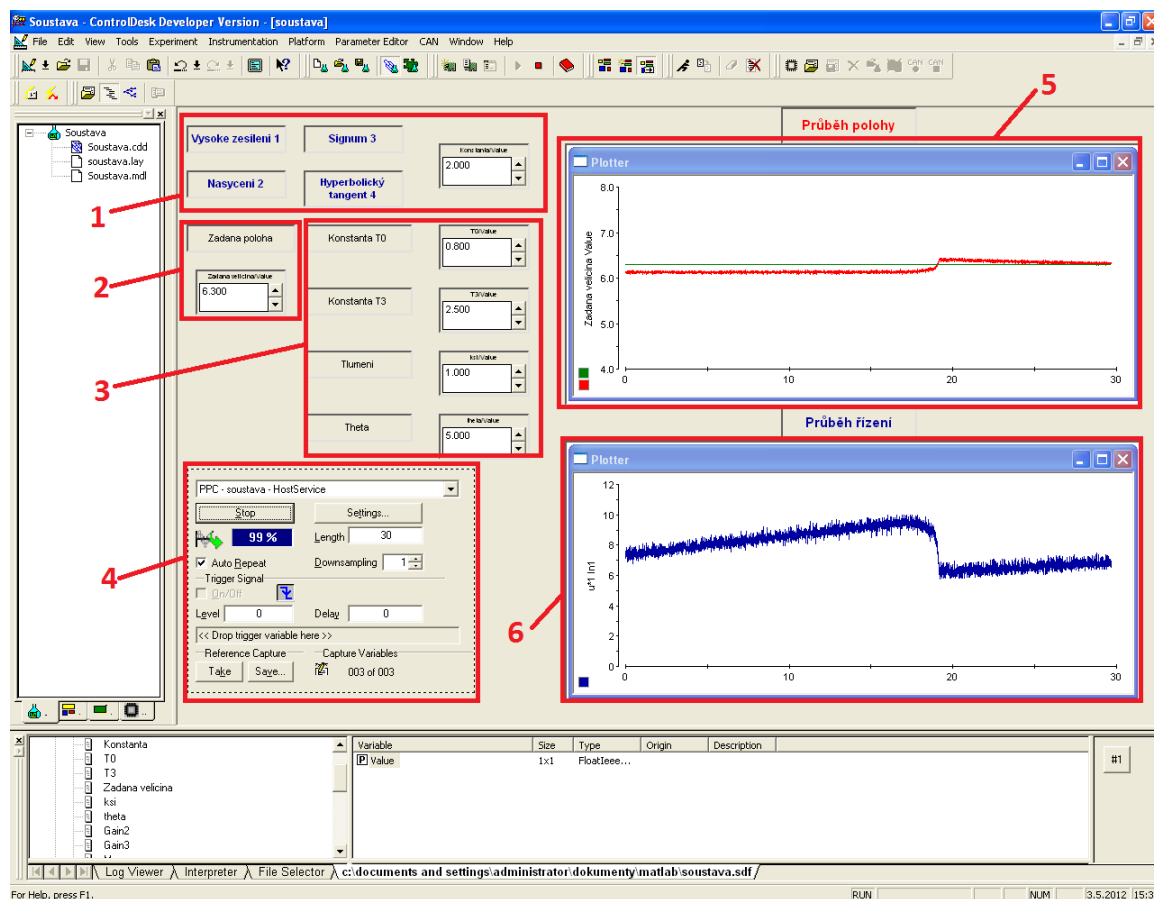
Obr. 32 Nový experiment

V dalším kroku, si rozvrhneme potřebné nástroje pro tvorbu vizuálního rozhraní. Těmto nástrojům poté přiřadíme odpovídající nahrané konstanty z Matlab/Simulink.



Obr. 33 Přirazení proměnné bloku Scope do funkčního bloku v prostředí ControlDesk

Poté ve vizuálním prostředí programu ControlDesk vytvoříme tlačítka pro vkládání hodnot ovlivňujících konstant T_0 , T_3 , θ , ξ , žádaná poloha, konstanta přepínající jednotlivé algoritmy, a grafy pro sledované veličiny. Nastavováním parametrů budeme ovlivňovat průběhy polohy a řízení, které sledujeme v reálném čase na obrazovce.



Obr. 34 Vytvořené ovládací prostředí pro řízení levitace klapky

Popis jednotlivých ovládacích prvků

1. Konstantou 1 až 4 zvolíme vybraný algoritmus řízení
2. Zde si nastavíme žádanou hodnotu polohy
3. Zde měníme parametry řízení, jedná se o časové konstanty T_0 , T_3 , tlumení ξ a hodnotu adaptační matice θ
4. Nastavení časové osy, ukládání průběhů
5. Průběh žádané a reálné polohy
6. Průběh řízení

10 ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo se seznámit se systémem dSPACE, který budeme aplikovat na laboratorní model levitace. Výsledkem diplomové práce je pomocí navržených algoritmů řídit polohu modelu levitace pomocí systému dSPACE.

Na začátku projektu jsem se seznámil se systémy dSPACE a jejich použití pro řízení a simulaci v reálném čase. Seznámil jsem se s metodou Hardware in the loop (HIL), se kterou pracují systémy dSPACE. Prostudoval jsem řídicí kartu DS1104 a ovládací panel CP1104, které používám pro řízení v reálném čase. Poté jsem se zabýval programovým prostředím Real-Time Interface (RTI), který slouží jako komunikace mezi daty Simulinku a řídicí kartou DS1104. Jako dalším jsem se zabýval programem ControlDesk, který slouží jako experimentální software dSPACE poskytující všechny funkce pro řízení a monitorování.

Další částí diplomové práce jsem se věnoval laboratornímu modelu levitace, ve které jsem se seznámil s jednotlivými částmi laboratorního modelu levitace. Popsal jsem matematický model soustavy s následným převedením na stavový popis modelu, ze kterého dostaneme hledané rovnice ve standardním tvaru pro metodu agregace stavových proměnných, které použijeme pro návrh jednotlivých algoritmů řízení.

Pro řízení modelu levitace jsem použil robustní algoritmy řízení s vysokým zesílením, klouzavé módy a jejich modifikace (signum, nasycení a hyperbolický tangent). Pro jednotlivé algoritmy jsem vyjádřil jejich matematický popis. Poté jsem pro jednotlivé algoritmy řízení vytvořil v programu Matlab/Simulink subsystémy s požadovanými vstupy a výstupy. Dále jsem si pro ověření správnosti navržených algoritmů, vytvořil dynamickou soustavu reprezentující model levitace. Pak jsem si ověřil simulačně správnost navržených algoritmů řízení, propojení jednotlivých bloků i funkční propojení jednotlivých bloků. Zde se vyskytly problémy s nastavením vhodných parametrů, které ovlivňují řízení.

U vysokého zesílení se volí obě časové konstanty malé, jelikož tím se zkracuje doba dosažení žádané polohy. Dalším faktorem je parametr θ , který nám při zmenšování zvyšuje překmit a podkmit. Hodnoty překmitu a podkmitu jsou větší, než žádáme, a to o 5%. Z průběhu řízení vidíme, že se jedná o řízení s vysokým zesílením. Tento algoritmus je citlivý i na malé změny hodnot.

U klouzavého řízení je prvním ovlivňujícím parametrem časová konstanta T_0 , která při zvětšení zvyšuje překmit a podkmit v průběhu polohy. Řízení u pak potřebuje větší čas, než se ustálí. Konstanta T_3 nám naopak při vyšších hodnotách způsobí snížení velkého překmitu, ovšem na úkor ustálení, což znamená, že se prodlouží a tím potřebuje řízení delší čas. U nízkých hodnot získáme rychlou reakci bez podkmitu. Řízení je však

rozkmitané a na počátku algoritmus nereaguje. Hodnota θ udává sklon řízení, čímž ovlivňuje také jeho rychlost. Čím nižší je hodnota, tím více nám zlepšuje průběhy vzhledem k překmitům. Vliv časových konstant je u všech tří funkcí klouzavého řízení podobný. U funkce signum nastal problém s nalezením té správné kombinace T_0 a T_3 . Hodnota θ je zde nastavena na hodnotu 1, a to kvůli tomu, že funkce signum nemá sklon. U funkce hyperbolického tangentu byl problém s citlivostí algoritmu na změny všech tří konstant. U polohy se průběh podstatě neměnil, ale u průběhu řízení byl dost ovlivněn značným kmitáním akční veličiny.

Po úspěšném otestování jednotlivých parametrů jsem jednotlivé řídicí algoritmy propojil s reálným modelem levitace. Propojení je realizováno pomocí systému dSPACE, a to řídicí kartou DS1104 a ovládacím panelem CP1104.

K ovládání celého modelu jsem využíval program ControlDesk, který umožňuje ovládání v reálném čase. V programu jsem vytvořil ovládací prostředí, ve kterém se můžou v reálném čase nastavovat ovlivňující parametry řízení, a sledovat výsledné průběhy, a vybírat mezi jednotlivými algoritmy řízení. Dále je zde možnost ukládání naměřených dat, a jejich následné vykreslení v programu Matlab.

Výsledné ověření algoritmů řízení na reálném modelu, bylo ovlivněno mnoho fyzikálními parametry, díky nimž bylo podstatě nemožné určit jednotlivé parametry pro řízení přesně nebo dokonce spočítat. U vysokého zesílení je omezena akční veličina v rozmezí 0-10V, tím pádem průběhy odpovídají průběhům funkce nasycení. Funkce signum se nepovedlo nastavit tak, aby se stabilizovala na požadované hodnotě. Funkce hyperbolický tangent se lišila od předchozích algoritmů tím, že průběh polohy klesal k požadované poloze z maximální polohy, naproti tomu algoritmy vysoké zesílení, a funkce nasycení stoupali k požadované hodnotě z počáteční polohy. Kmitání kolem žádané veličiny, které jsou v grafech znázorněné, by se dali odstranit použitím filtru.

Celá praktická část spočívala ve vytvoření simulačních modelů vybraných algoritmů řízení, propojení reálného modelu se systémem dSPACE a návrhu a realizaci ovládacího prostředí v programu ControlDesk pro řízení polohy modelu levitace v reálném čase.

11 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

BALÁTEŘ, J. *Vybrané statě z automatického řízení*. Brno, skripta VUT Brno, 1991, 359 s., ISBN 80-214-0271-7.

BALÁTEŘ, J. 2003. *Automatické řízení*. Praha: nakladatelství BEN, 2003, 663s., ISBN 80-7300-020-2.

BALLUFF. *Snímače pro automatizaci*. www.balluff.cz, návody, Micropulse – mikro odměřování, 2001.

DANISZ, R. *Využití robustních algoritmů pro řízení technologického procesu*. VŠB-TU Ostrava, kat. ATŘ – 352, 2002, 62 stran. Diplomová práce. Vedoucí: Wagnerová, R.

dSPACE GmbH. *DS1006 Processor Board – Features*. Paderborn: dSPACE GmbH, November 2006, 60p.

dSPACE GmbH. *DS2211 HIL I/O Board – Features*. Paderborn: dSPACE GmbH, March 2007. 218p.

dSPACE GmbH. *dSPACE Simulator Mid-Size Based on DS2211 – Features*. Paderborn: dSPACE GmbH, March 2007, 248p.

DUŠEK, F. 2000. *Matlab a simulink úvod do používání*. Pardubice, 200, 146s., ISBN 80-7194-273-1.

FARANA, R. & WAGNEROVÁ, R. 2001. *Sliding Mode Control of Complex Control Systems*. Mine Planning and Equipment Selection 2001, Oxford & IBH Publishing Co. PVT. LTD, 2001, s. 11-17. 81-204-1502-7

HAVLÁSEK, A. 1997. *Návrh a realizace laboratorního regulačního obvodu „Levitace ocelové kuličky“*. Diplomová práce. Ostrava – VŠB, FS, kat. ATŘ.

KLEČKA, R. *Měření na vozidlech a řízení jejich zkoušek*. Ostrava: katedra automatizační techniky a řízení. VŠV-TU Ostrava, 2009. 126 stran. Doktorská práce. Vedoucí: Tůma, J., konzultant: Kočí, P.

MAHDAL, M. & KLEČKA, R. *Application of CAN Bus with dSPACE Simulator Usage*. Transactions of the VŠB-Technical University of Ostrava. Mechanical Series. Vol. LIV. 2008, No.2., příspěvek č.1626,s.85-90, ISSN 1210-0471.

MAHDAL, M. & KLEČKA, R. *Komunikace simulátoru dSPACE s vybranými komponenty automobilu*. In XXXIII. Seminar ASR '2008''Instruments and Control''. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 25.4.2008, pp. 205 – 212. ISBN 978–80–248–1727–9.

NOSKIEVIČ, P. 1999. *Modelování a identifikace systémů*. Ostrava: MONTANEX a.s., 1999. 276 s. ISBN 80-7225-030-2.

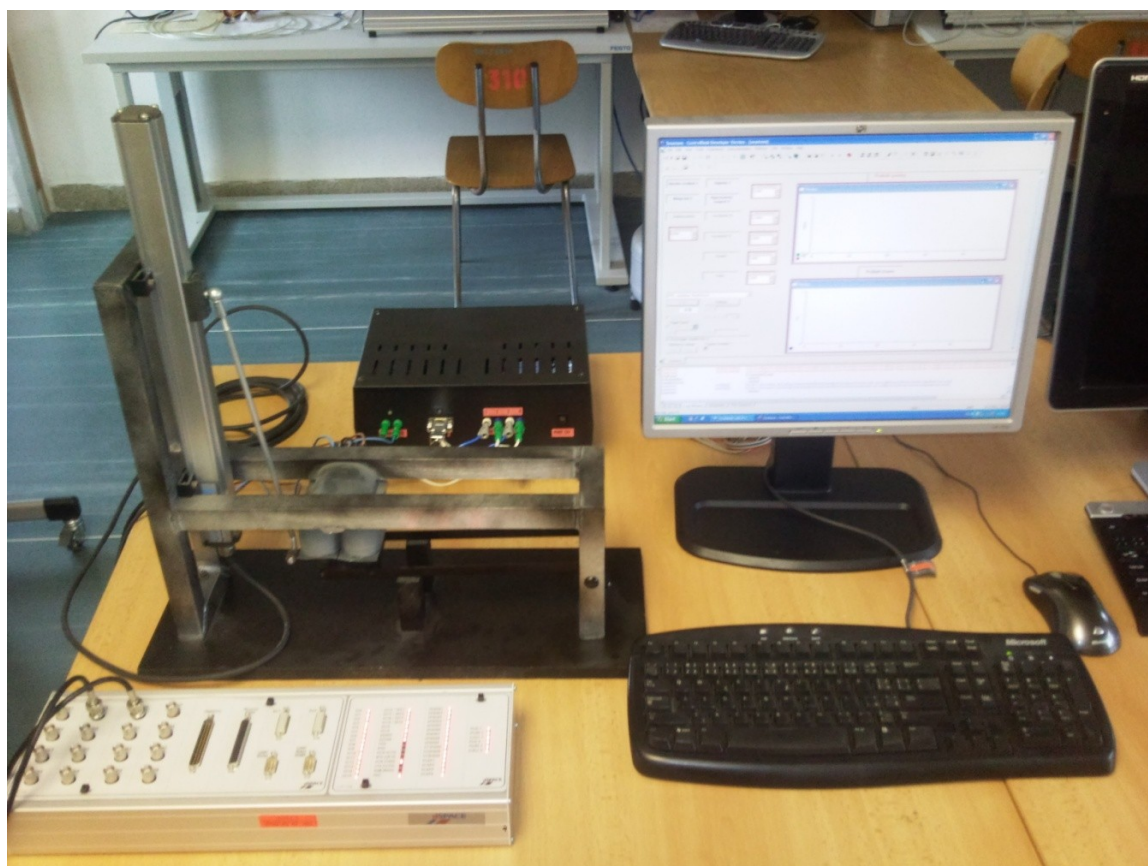
VÍTEČEK, A., VÍTEČKOVÁ, M. 1999. *Optimální systémy řízení*. Ostrava: VŠB-TUO, 1999. ISBN 80-7078-736-8.

WAGNEROVÁ, R. 2000. *Position Control of levitation Object by Using Sliding Modes*. In Proceedings of International Scientific Conference of FME, Session 4: Automation Control and Applied informatics. [online]. Ostrava: VŠB-TUO Ostrava, 2000, vol. 10, 5p. [cited 2000-09-05]. ISBN 80-7078-798-8.

VEČEŘA, L. 2005. *Návrh robustních algoritmů řízení technologických procesů*. Diplomová práce. Ostrava – VŠB, FS, kat. ATR, 2005.

YAMAMOTO, S & KIMURA, H. 1995. *Robust stabilization for parametric uncertainty with application to magnet levitation*. In: Francis, B. A. – Khargonekar, P. P.(editors): Robust kontrol theory, New York, Springer – Verlag, Inf. 1995

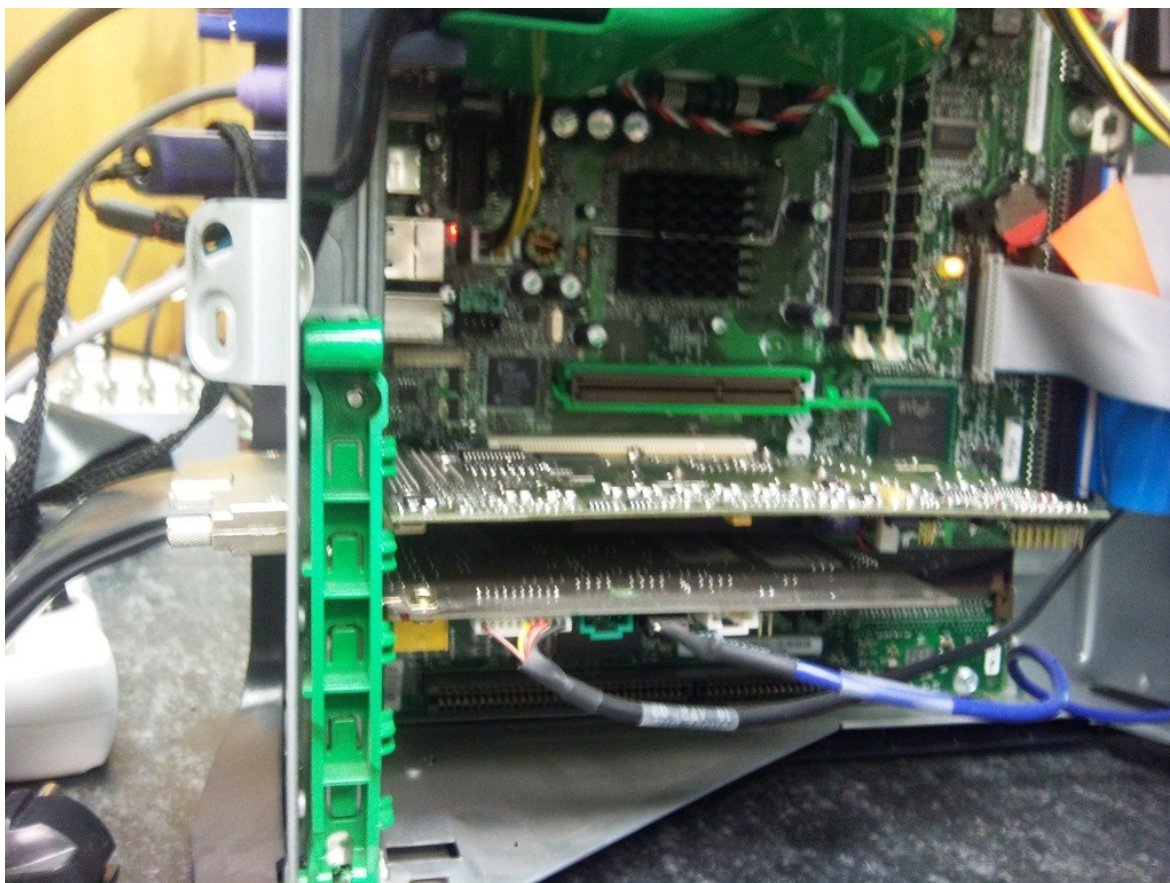
PŘÍLOHA



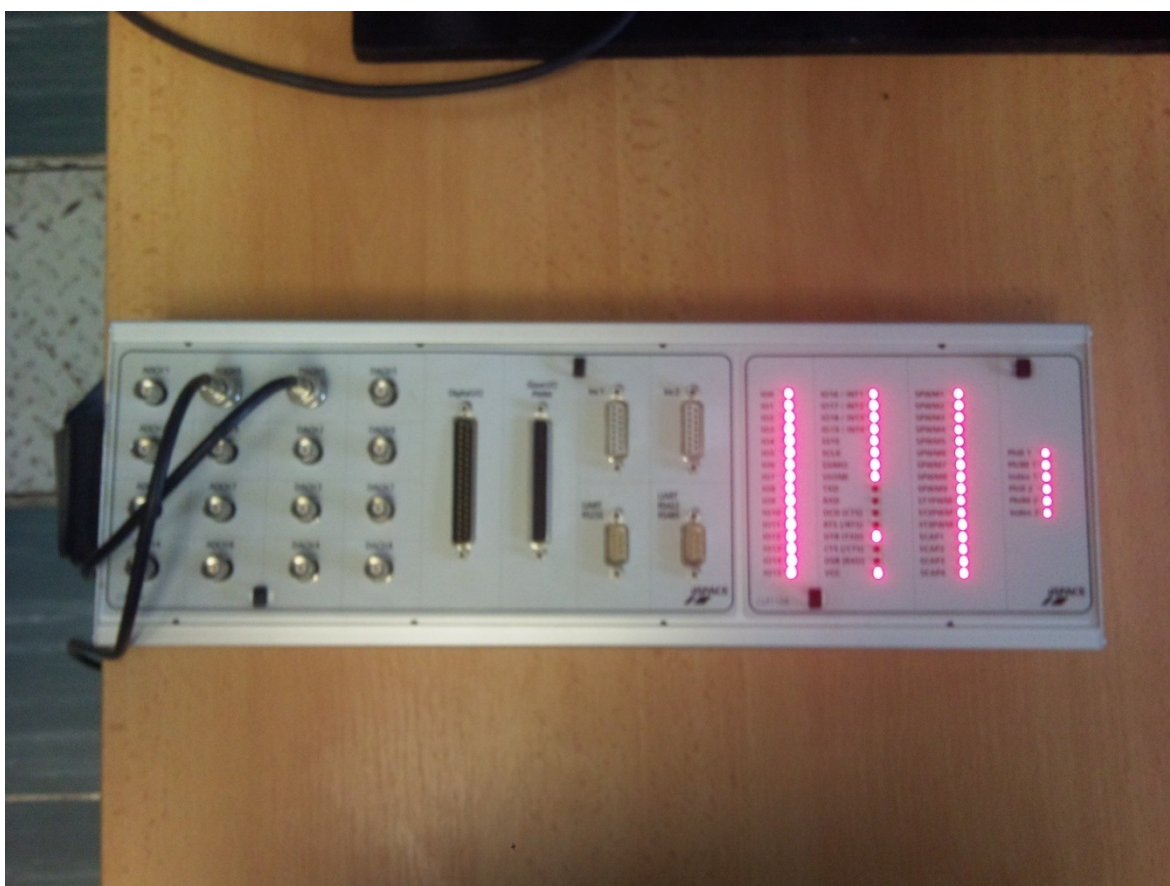
Obr. 35 Pracoviště s modelem levitace



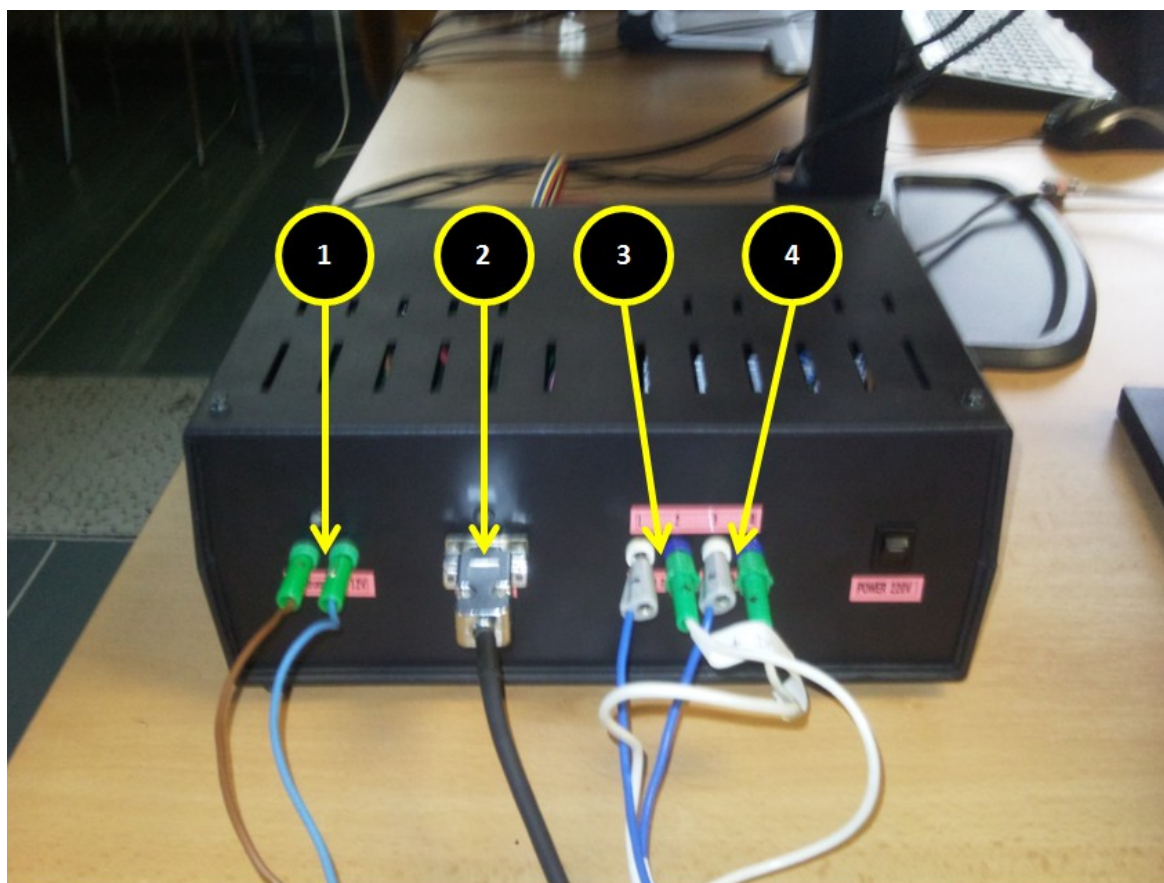
Obr. 36 Propojení s kartou DS1104



Obr. 37 Zapojená karta DS1104 v PC



Obr. 38 Ovládací panel CP1104



Obr. 39 Napájecí zdroj, s unifikací signálů

1. Napájení elektromagnetu
2. Napájení snímače polohy
3. Vstup do reálné soustavy DAC
4. Výstup z reálné soustavy ADC